

Métodos para el cálculo de la evaporación freática en suelos desnudos en días lluviosos y secos

Zhenlong Wang, Yingying Xu, Guoqiang Dong, Haishen Lv, Yue Fan y Yining Wang

RESUMEN

Con el fin de representar el impacto de la lluvia en la evaporación freática, este estudio analiza la evaporación freática y el coeficiente de evaporación freática entre la evaporación superficial y la profundidad del suelo en el suelo negro de Shajiang y el suelo Fluyo-aquic. Hemos mejorado el marco matemático de uso común existente, establecimos dos modelos de cálculo de evaporación freática en días sin lluvia y luego calculamos el modelo de cálculo de la reducción de la evaporación freática en días lluviosos. Finalmente, se propusieron modelos de cálculo de evaporación en días de lluvia en dos suelos. Los resultados muestran que el coeficiente de evaporación se ve afectado tanto por la profundidad como por la capacidad de evaporación del agua superficial. La reducción de la evaporación del suelo negro de Shajiang aumentó con la profundidad y la tendencia creciente se desaceleró gradualmente hasta acercarse a cero. La reducción de la evaporación del suelo freático Fluyo-aquic disminuyó primero y luego aumentó con la profundidad, alcanzando un mínimo a 0,4 m. La reducción de la evaporación freática en ambos suelos disminuyó con el aumento en el nivel de lluvia y disminuyó con el aumento en la duración de la lluvia mostrando un 'tipo S invertido'. En resumen, los modelos de cálculo compuestos de evaporación freática en días lluviosos y sin lluvia tienen buenos resultados de ajuste y predicción, lo que puede mejorar la precisión de los cálculos de evaporación freática.

Palabras clave | cálculo de la evaporación freática, día sin lluvia, día lluvioso

DESTACAR

- Se determinó cómo la profundidad del nivel freático y la evaporación superficial influyen en la evaporación freática.
- Se establecieron los modelos de cálculo exponencial de la evaporación freática en condiciones sin lluvia.
- La disminución de la evaporación freática cuando aumenta el nivel de lluvia y la duración de la lluvia.
- Se estableció el modelo de evaporación freática en condiciones de lluvia.

Zhen Long Wang
Dong de Guoqiang
El Laboratorio Clave de Recursos Hídricos, (Los
Comisión del Río Hualhe del Ministerio de Recursos
Hídricos (P.R.C.) Instituto de Investigación
Hidráulica, Provincia de Anhui,
Anhui 233000,
Porcelana

Yingying Xu (Autor correspondiente)
Yue Fan
facultad de ciencias,
Universidad Hohai,
Nankín 210098,
Porcelana
Correo electrónico:xyyup1996@163.com

Haishen Lv
Facultad de Hidrología y Recursos Hídricos,
Universidad de Hohai,
Nankín 210098,
Porcelana

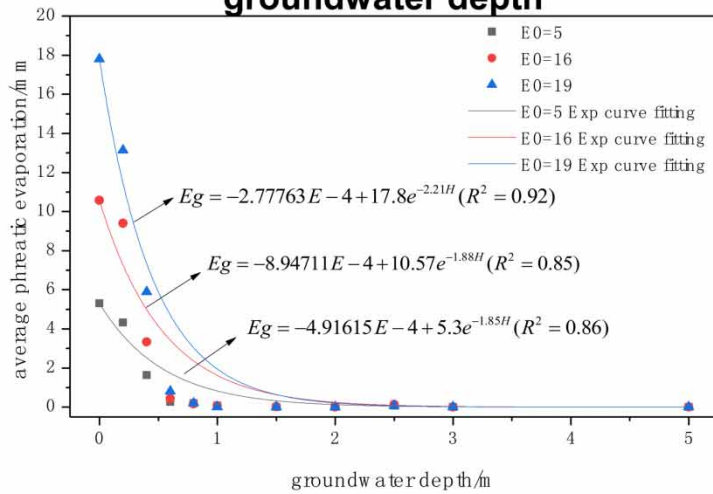
Yining Wang
Instituto de Investigación Hidráulica de Nanjing,
Nanjing 210029,
Porcelana

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de Creative Commons Attribution License (CC BY 4.0), que permite la copia, adaptación y redistribución, siempre que se cite correctamente el trabajo original (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

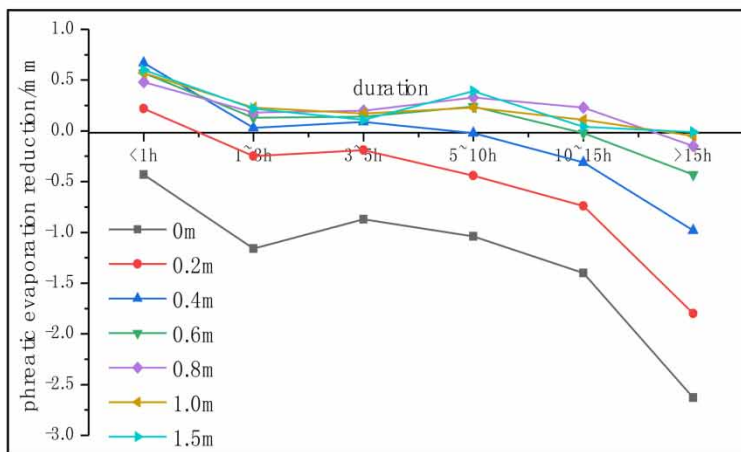
doi: 10.2166/nh.2020.017

GRÁFICAMENTE ABSTRACTO

Relationship between phreatic evaporation and groundwater depth



Relationship between phreatic evaporation reduction and rainfall duration



INTRODUCCIÓN

La evapotranspiración freática se refiere al proceso de transferencia de agua subterránea a capas de suelo no saturadas y a través del suelo y la vegetación hacia la atmósfera (Liu et al. ----). La evapotranspiración y la evaporación freática están íntimamente ligadas ya que una conduce y limita a la otra. La investigación y el análisis de los principios y métodos de cálculo de la evaporación freática son de gran importancia en la evaluación de los recursos hídricos, la prevención y el control de la salinización del suelo y el cálculo de la demanda ecológica de agua.

Actualmente, se han realizado muchos estudios a nivel internacional sobre los principios y el cálculo de la evaporación freática. Felipe (----)La investigación sobre la evaporación de la superficie del suelo descubierto encontró que la evaporación de la superficie del agua libre ocurre en los lagos y la evaporación freática tiene lugar en el nivel freático poco profundo de las salinas en función de la profundidad del nivel freático. Basado en modelos numéricos, Muñoz-Pardo et al. (----)desarrolló una relación directa entre la profundidad del nivel freático y la recarga y evaporación e investigó cómo esta relación podría contribuir a mantener estable el nivel freático. Marazuela et al. (----)usó el Salar de Atacama como área experimental para estudiar los procesos naturales y antrópicos acoplados y encontró que en el régimen natural, el nivel freático presentaba un descenso gradual debido a que la evaporación era mayor que la recarga la mayor parte del tiempo, pero el bombeo de salmuera provoca una caída en el nivel freático, lo que resulta en una disminución de la tasa de evaporación. Marazuela et al. (----)midió el nivel freático y la tasa de evaporación, obtuvo una curva de evaporación que relaciona la evaporación freática con la profundidad del nivel freático, y luego realizó un análisis espaciotemporal y la aplicación de los resultados a un modelo numérico para mejorar el diseño de explotación de salmuera. Tyler et al. (----)analizó los procesos hidráulicos y de solutos del agua subterránea en Playa Lake y Sabkhat y construyó un modelo basado en la física del suelo para predecir la respuesta del nivel freático a los cambios de recarga aguas arriba o cambios en la evaporación potencial. Johnson et al. (----) estudió las tasas de evaporación de las aguas subterráneas poco profundas utilizando el enfoque de cámara en seis cuencas cerradas en el Altiplano del norte de Chile y consideró que está fuertemente relacionada con la profundidad del agua subterránea y la textura del suelo y obtuvo curvas de evaporación ajustando relaciones exponenciales y de potencia en función de la profundidad del agua subterránea. Liu et al. (----)analizó los efectos de la meteorología, los cultivos, el suelo,

la profundidad del agua subterránea y la precipitación en la evaporación freática. Su análisis condujo al establecimiento de un modelo para la evaporación freática en diferentes períodos de tiempo. Zhang et al. (----)analizó las condiciones de control del modelo de cálculo de la evaporación freática y estableció un nuevo modelo cuantitativo para la evaporación freática que evita el problema de sobreestimar la evaporación freática cuando la capacidad de evaporación atmosférica es grande.

En resumen, se ha realizado mucha investigación para mejorar los modelos de evaporación y el análisis del agua freática, pero hay pocos estudios sobre los efectos de la lluvia en la evaporación freática y métodos cuantitativos que distingan entre días lluviosos y secos. Basado en datos de evaporación freática y observaciones meteorológicas de la Estación Experimental de Wudaogou de 1993 a 2015, este documento analiza la influencia de la evaporación y la profundidad del suelo negro y flujo-aquí de Shajiang en la evaporación freática y su coeficiente en un escenario de suelo desnudo. En base a esta ley, se ha mejorado la fórmula empírica para establecer un modelo de evaporación freática en días sin lluvia en dos suelos y estimar los efectos del agua de lluvia sobre la evaporación freática. Comparar las diferencias entre estimaciones, medidas y predicciones del modelo, este estudio pudo cuantificar, en diferentes suelos (negro y amarillo) y bajo diferentes condiciones (lluviosa y seca), el efecto del agua de lluvia y la profundidad del agua subterránea en la evapotranspiración. El modelo de cálculo de la duración de las lluvias. Basado en el modelo integrado de cálculo de evaporación freática en días sin lluvia y el modelo de cálculo de reducción de evaporación freática en días lluviosos, se estableció y verificó el modelo de cálculo de evaporación freática en días lluviosos del suelo negro de Shajiang y el suelo amarillo Fluyo-aquí para proporcionar soporte técnico para explorar el impacto de las lluvias en la evaporación freática.

EXPERIMENTOS Y MÉTODOS

Vista general del área experimental

Este experimento se llevó a cabo en la Estación Experimental de Hidrología y Recursos Hídricos de Wudaogou en la ciudad de Bengbu,

Provincia de Anhui. La Estación Experimental de Wudaogou está en Hubei.

La estación experimental integral a gran escala en el área de la llanura, ubicada en 33°09'norte, 117°21'e, está ubicado en un campo de semillas originales en Xinmaqiao, provincia de Anhui, 28 km al norte de la ciudad de Bengbu, provincia de Anhui, y pertenece a la estación experimental de llanura cerrada. La llanura de Huaibei tiene un clima monzónico semiárido y semihúmedo típico con cuatro estaciones distintas, lluvia y calor simultáneos, seco en invierno y caluroso y lluvioso en verano, las lluvias en la estación lluviosa (junio-septiembre) representan aproximadamente 60 % de la precipitación anual. Hay dos tipos principales de tipos de suelo: suelo negro de Shajiang (54%) y suelo Fluyo-aquic (33%). La estación experimental tiene 62 juegos de lisímetros subterráneos a gran escala que están equipados con muestras de suelo no perturbadas de dos suelos, a saber, suelo negro arena jengibre y suelo fluyo-aquic amarillo. El lisímetro está provisto de diferentes profundidades de agua subterránea. En condiciones de suelo desnudo, la profundidad del agua subterránea del suelo negro de Shajiang es: 0,0, 0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0, 4,0, 5,0 m. La profundidad del agua subterránea del suelo Fluyo-aquic amarillo bajo condiciones de suelo descubierto es: 0,0, 0,2, 0,4, 0,6, 1,0, 2,0, 3,0, 4,0 m. Las mediciones meteorológicas pueden recopilar datos sobre la temperatura de la superficie, la temperatura promedio, la evaporación de la superficie del agua, la radiación incidente (luz solar), la humedad relativa, la velocidad del viento, la diferencia de saturación, la humedad absoluta, la diferencia de presión de vapor de agua y las precipitaciones. El nivel freático es poco profundo con fluctuaciones entre 1,5 y 3,5 m. temperatura promedio, evaporación de la superficie del agua, radiación incidente (luz solar), humedad relativa, velocidad del viento, diferencia de saturación, humedad absoluta, diferencia de presión de vapor de agua y lluvia. El nivel freático es poco profundo con fluctuaciones entre 1,5 y 3,5 m. temperatura promedio, evaporación de la superficie del agua, radiación incidente (luz solar), humedad relativa, velocidad del viento, diferencia de saturación, humedad absoluta, diferencia de presión de vapor de agua y lluvia. El nivel freático es poco profundo con fluctuaciones entre 1,5 y 3,5 m.

Instalaciones experimentales y selección de datos

Este documento se basa en el lisímetro subterráneo a gran escala en la Estación Experimental de Wudaogou. El área del instrumento de medición de suelo desnudo es de 0,3 m².

Se estudiaron dos tipos principales de suelo (suelo negro de Shajiang y suelo amarillo Fluyo-aquic) en el área de la llanura de Huaibei. Las profundidades del agua subterránea de los cilindros de medición de suelo negro de Shajiang seleccionados fueron 0,0, 0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0, 5,0 m. Las profundidades del agua subterránea del cilindro de medición de suelo Fluyo-aquic amarillo seleccionado son 0,0, 0,2, 0,4, 0,6, 1,0, 2,0, 3,0, 4,0 m. De acuerdo con el principio del balance hídrico, la evaporación freática bajo diferentes condiciones de profundidad del agua subterránea se mide por

el lisímetro a diario. La evaporación del agua superficial se mide con el plato de evaporación del campo meteorológico E601. Las precipitaciones se miden con un pluviómetro meteorológico estándar. La duración de la lluvia es monitoreada por meteorólogos. De acuerdo con la medición del pluviómetro, la evaporación freática y los datos meteorológicos se ajustaron mediante el análisis de la serie de datos de 1993 a 2015, y los datos se pronosticaron con los datos de 2018. La clasificación de los niveles de lluvia se basa en los criterios proporcionados por la agencia meteorológica de China. La división de la duración de la lluvia se divide en cinco niveles según la cantidad. Los criterios de clasificación específicos se muestran en [tabla 1](#).

Modelo matemático

La construcción del modelo en este documento se completa de acuerdo con los pasos básicos del modelado matemático ([Figura 1](#)).

Preparación del modelo: Comprenda los antecedentes reales de la evaporación del buceo, aclare la importancia práctica del modelo de cálculo de la evaporación del buceo en días lluviosos y no lluviosos, y recopile la información necesaria.

Establecimiento modelo: Los gráficos se utilizan para describir la relación entre variables y MATLAB se utiliza para cuantificar sus relaciones matemáticas específicas para establecer las estructuras matemáticas correspondientes.

Solución modelo: Utilice los datos obtenidos para calcular (estimar) todos los parámetros del modelo.

Verificación del modelo: Compare los resultados del análisis del modelo con la situación real para verificar la precisión, la racionalidad y la aplicabilidad del modelo.

Aplicación modelo: El modelo establecido debe producir beneficios en la aplicación práctica, y mejorar y perfeccionar constantemente en su aplicación.

tabla 1 | Criterios de clasificación del nivel de lluvia y la duración de la lluvia

	Tipos de lluvia/mm	Duración/h
1	Lluvia ligera (<10)	0-1
2	Lluvia moderada (10-24,9)	1-3
3	Lluvia intensa (25-49,9)	3-5
4	Tormenta de lluvia (50-99,9)	5-10
5	Tormenta extrema (100-199,9)	10-15

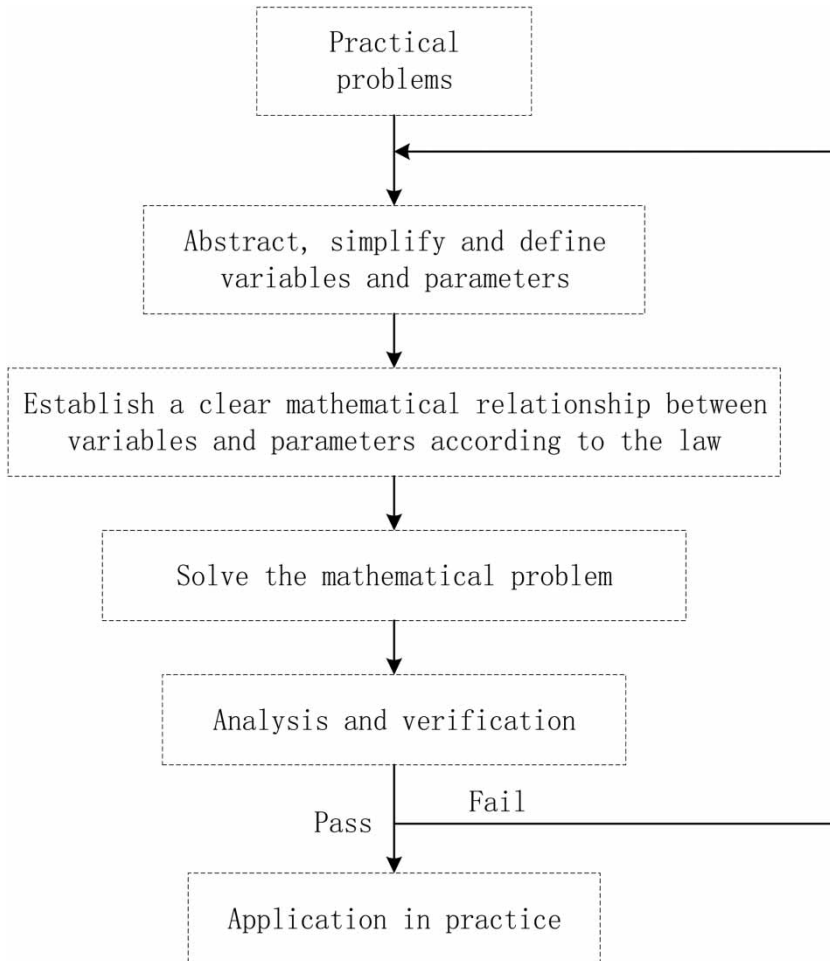


Figura 1 | Proceso de modelado matemático.

Ajuste de la curva de evaporación freática

En problemas científicos y de ingeniería, normalmente se pueden obtener varios datos discretos mediante métodos como el muestreo o los experimentos. A partir de estos datos se obtiene una función continua (curva) o una ecuación discreta más densa que coincide con los datos conocidos. Este proceso se llama ajuste de curvas. En este documento, se utilizan los siguientes pasos para establecer una curva de ajuste para la evaporación freática.

Paso 1: Obtener los datos correspondientes de variables independientes y variables dependientes a través de experimentos de observación. Observar la evaporación freática, la profundidad del nivel freático y los datos de evaporación superficial en días lluviosos; observe la evaporación freática, la profundidad del nivel freático, la evaporación del agua, la precipitación y la duración de la precipitación en los datos de los días lluviosos.

Paso 2: Observe y analice la distribución de los puntos de datos, la relación específica entre la variable independiente y la variable dependiente y determine la función de la curva ajustada.

Paso 3: De acuerdo con el principio de mínimos cuadrados generalizados, use conjuntos de datos conocidos combinados con software de computadora para estimar los valores de los parámetros en la función de ajuste de curvas.

Paso 4: Lleve las estimaciones de los parámetros a la función de ajuste y establezca el modelo de cálculo de la evaporación freática del día lluvioso final y del día sin lluvia.

Estimación por mínimos cuadrados

Cuando el modelo se determina con base en la relación entre las variables, el método para determinar el

parámetros en el modelo de acuerdo con el principio de desviación mínima cuadrática se denomina estimación de mínimos cuadrados.

Dado un conjunto de datos (X, Y) y conocer la función de ajuste $\varphi(X)$, que contiene parámetros (k_1, \dots, s)

$$X = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{21} & \dots & X_{norte1} \\ X_{12} & X_{22} & \dots & X_{norte2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{1metro} & X_{2metro} & \dots & X_{nuevoMijico} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_{metro})^T \quad (2)$$

donde n es el número de variables de observación y m es el número de muestras de observación. Para estimar los valores de los parámetros en el modelo, la suma del cuadrado de las desviaciones entre Y y $\varphi(X)$ debe ser minimizado,

$$\sum_j (\varphi(X_j) - Y_j)^2 \rightarrow \min \quad (3)$$

Según las condiciones necesarias del extremo del multivariante:

$$\frac{\partial L}{\partial a_k} = 0 \quad (k=1, \dots, s) \quad (4)$$

Resuelva ecuaciones para obtener estimaciones de parámetros y las estimaciones de parámetros se sustituyen en el modelo para establecer la fórmula funcional específica del modelo.

Índice de evaluación del modelo

Este documento utiliza el error absoluto medio (MAE), el error de raíz cuadrada (RMSE) y el coeficiente de determinación (R^2). Estos indicadores estadísticos evalúan la precisión del modelo; las fórmulas para cada indicador estadístico son las siguientes:

$$MAE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |\hat{y}_i - y_i| \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (6)$$

$$R^2 = \frac{RSS}{TSS} = 1 - \frac{SSE}{TSS} \quad (7)$$

$$RSS = \sum_{i=1}^m (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (8)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2 \quad (9)$$

$$TSS = \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2 \quad (10)$$

donde \hat{y}_i es el valor calculado de la evaporación freática, y_i es el valor medido de la evaporación freática, \bar{y} es la media del valor medido de la evaporación freática. m es el número de muestras, $i=1, \dots, m$ es el número de muestra. Cuanto más R^2 variable independiente métrica interpreta la variable dependiente, cuanto más se acerque el valor a 1. Cuanto mayor sea el grado de interpretación de la variable dependiente, mayor es la precisión del modelo. El valor de MAE, RMSE es mayor cuanto menor es la precisión del modelo pequeño.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Preparación del modelo

Relación entre la evaporación freática y la evaporación superficial

La evaporación del agua freática se ve afectada por la capacidad de evaporación atmosférica, incluidos los elementos meteorológicos, como la temperatura superficial, la temperatura media, la evaporación superficial del agua, la radiación incidente (sol), la humedad relativa, la velocidad del viento y las precipitaciones. Investigación relevante (Yuet al. ----) muestra que la evaporación se puede utilizar en lugar de la capacidad de evaporación atmosférica para estudiar la evaporación del agua freática. Para evitar el impacto de los cultivos en la evaporación freática, se probaron las condiciones de suelo desnudo para establecer la relación entre la evaporación freática y la evaporación superficial. **Figura 2** muestra la relación entre la evaporación freática promedio y la evaporación superficial promedio del suelo negro de Shajiang y el suelo de marea amarillo bajo diferentes condiciones de profundidad de agua subterránea (H) desde 1993 hasta 2015.

se puede ver desde **Figura 2** que para ambos suelos bajo las mismas condiciones (es decir, la profundidad del agua subterránea), la

la evaporación del agua freática y la evaporación del agua superficial tienen una relación de función de potencia, la relación funcional es significativa, es decir, la evaporación del agua freática aumenta con la evaporación del agua superficial. Cuando se aumenta hasta cierto punto, la evaporación del buceo está, generalmente, restringida a un cierto límite. La razón de este fenómeno es que la evaporación del agua freática se ve afectada tanto por la capacidad de evaporación atmosférica como por la capacidad de transporte de agua del suelo. Cuando la capacidad de evaporación atmosférica es menor que la capacidad hídrica del suelo, la evaporación freática se ve limitada principalmente por elementos meteorológicos y aumenta la evaporación del agua superficial. Cuando la capacidad de evaporación atmosférica es mayor que la capacidad de transporte de agua del suelo, Yuet al. ----). Por lo tanto, cuando el nivel de evaporación superficial es alto, la correlación entre la evaporación freática y la evaporación superficial se debilita, lo que se manifiesta por el alto grado de dispersión del punto de observación cerca de la curva ajustada, y el ajuste es peor.

También se puede ver desde Figura 2 que la influencia de la evaporación del agua superficial en el suelo amarillo Fluyo-aquic es mayor que la del suelo negro Shajiang, que está determinada por la textura de los dos tipos de suelo. La textura es el principal factor que afecta la conductividad del agua del suelo y los parámetros de movimiento del agua del suelo. El coeficiente de evaporación superficial disminuyó con el aumento del contenido físico de arcilla del suelo; el contenido de arcilla del suelo negro de Shajiang representó el 13,1%, polvo (49,4%), arena (37,5%). En suelo amarillo Fluyo-aquic, contenido de arcilla

representó el 2,0%, polvo (11,5%) y arena (37,5%). El suelo negro arenoso es más viscoso que el suelo amarillo Fluyo-aquic que es menos poroso y no propicio para la migración del agua.

– es decir, tiene poca permeabilidad al agua.

Relación entre la evaporación y la profundidad del agua subterránea

figura 3 muestra la relación entre la evaporación freática promedio y la profundidad del suelo negro de Shajiang y el suelo amarillo Fluyo-aquic bajo diferentes evaporaciones superficiales del agua (MIo) condiciones de 1993 a 2015. Se puede ver desde figura 3 que la evaporación está exponencialmente relacionada con la profundidad de los dos suelos. A medida que aumenta la profundidad, la evaporación disminuye gradualmente. Mayores niveles de evaporación en la superficie conducen a una evaporación freática más severa que disminuye con la profundidad. A medida que aumenta la profundidad, la evaporación freática aumenta con la evaporación de la superficie del agua, pero el aumento de la evaporación freática se reduce en función de la curva exponencial. El efecto de la capacidad de evaporación atmosférica sobre la evaporación freática disminuye con el aumento de la profundidad enterrada. A menor profundidad, el agua subterránea sube directamente a la superficie a través de capilares y entra en la atmósfera. La evaporación es rápida y grande. A medida que aumenta la profundidad, la evaporación del suelo superior pierde agua continuamente y se expande hacia abajo. Al hidratarse lentamente, se aumenta la distancia de transporte del agua. Se debilita la influencia de la evaporación atmosférica y la capacidad de la zona no saturada de transportar agua por capilaridad; cuando se aumenta la profundidad hasta cierto punto, el agua subterránea deja de evaporarse (Zhu et al. ----).

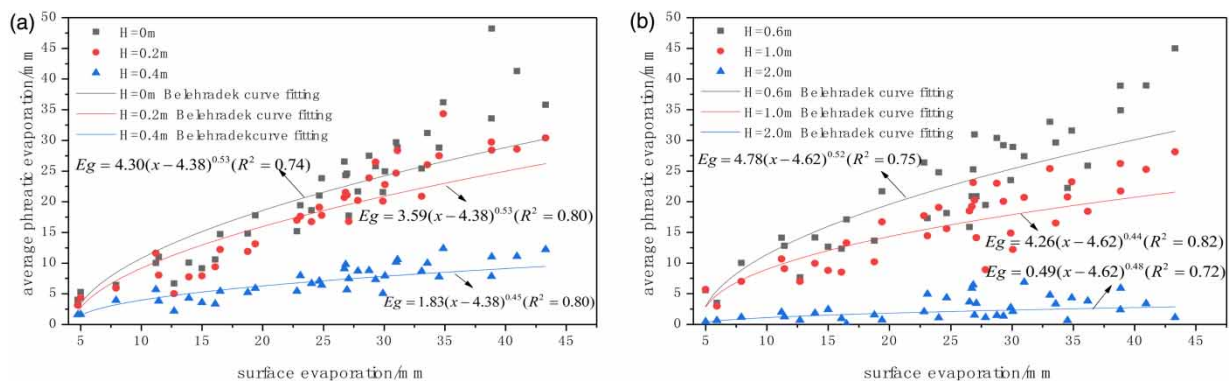


Figura 2 | Relación entre la evaporación freática y la evaporación superficial de (a) suelo negro de Shajiang, (b) suelo fluvo-aquático amarillo.

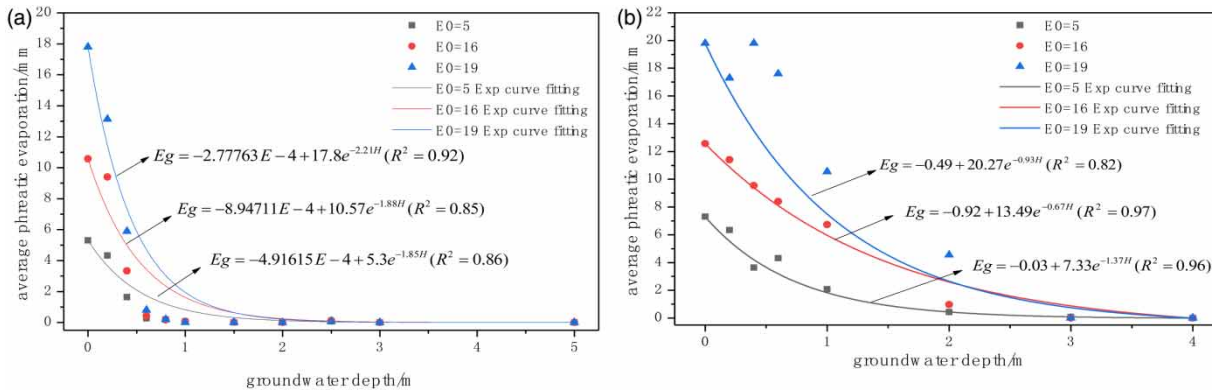


figura 3 | Relación entre la evaporación freática y la profundidad del agua subterránea de (a) suelo negro de Shajiang, (b) suelo fluvo-acuático amarillo.

También se puede ver que bajo diferentes condiciones de evaporación superficial, la evaporación freática del suelo negro de Shajiang tiende a detenerse (~0%) a 2 m; es decir, la profundidad límite de evaporación freática del suelo negro de Shajiang en esta área es de aproximadamente 2 m. marazuela et al. (----)obtenido valores similares en el Salar de Atacama, la capacidad de amortiguamiento termina cuando el nivel freático se agota por debajo de 0,5 a 2 m de profundidad. La profundidad límite de evaporación freática del suelo amarillo Fluyo-aquic es mucho mayor (~150–200%) que el suelo negro de Shajiang, hasta 3–4 m. La diferencia está determinada por las propiedades y la textura del suelo (es decir, el suelo amarillo Fluyo-aquic es mucho más poroso).

La profundidad del agua subterránea determina la distancia de transporte del agua cuando el agua freática se evapora. A medida que aumenta la profundidad, aumenta la distancia de transporte del agua, disminuye la influencia de la evaporación atmosférica y se debilita la capacidad de la zona no saturada para transportar agua por capilaridad. De acuerdo con los datos de 1993 a 2015, se calculó el coeficiente de evaporación freática de diferentes condiciones de evaporación en el suelo negro de Shajiang y en el suelo fluvoacuático amarillo. Se analizó la relación con la profundidad del agua subterránea. Ver (Figura 4(a)) Shajiang suelo negro y (Figura 4(b)) Suelo amarillo fluvo-acuico.

Relación entre el coeficiente de evaporación, la evaporación superficial y la profundidad del agua subterránea

Figura 4 muestra que a medida que aumenta la profundidad, el coeficiente de evaporación freática de los dos suelos disminuye gradualmente. La relación entre el coeficiente de evaporación freática y los cambios de profundidad con la evaporación del agua superficial no tiene relación con la profundidad. se puede ver desde Figura 4(a) que bajo la misma profundidad del suelo negro de Shajiang, cuanto menor es la evaporación superficial, mayor es la evaporación

El coeficiente de evaporación freática es la relación entre la evaporación freática y la evaporación superficial en el mismo período.

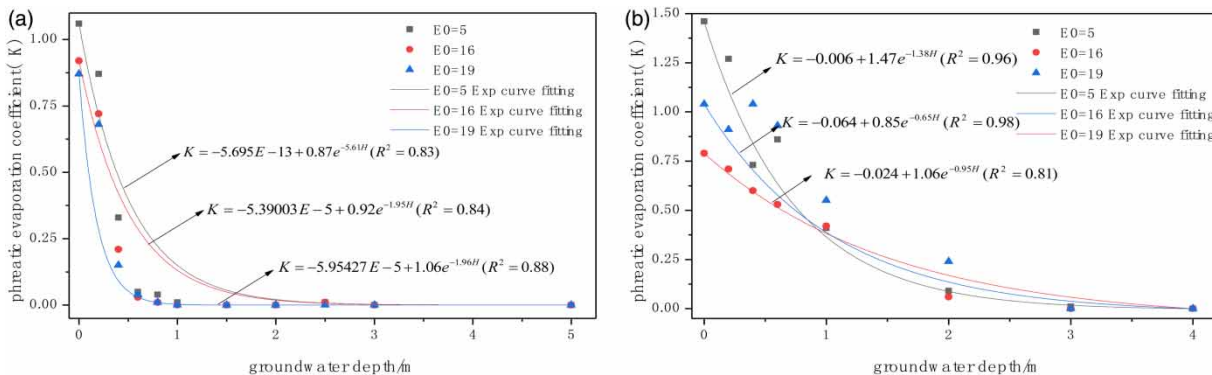


Figura 4 | Relación entre el coeficiente de evaporación, la evaporación superficial y la profundidad en (a) suelo negro de Shajiang, (b) suelo fluvo-acuático amarillo.

coeficiente de agua freática. 0 m (b) El suelo amarillo fluyo-acuático muestra que el coeficiente de evaporación de cada superficie de agua es cercano a 1, es decir, cuando la profundidad es de 0 m, la evaporación freática es aproximadamente igual a la evaporación en la superficie. se puede ver desde [Figura 4\(b\)](#) que cuando la profundidad es mayor a 1 m, el coeficiente de evaporación del suelo amarillo fluyo a quic se ve muy afectado por la evaporación superficial y aumenta con la evaporación superficial. Por debajo de la profundidad enterrada de 1 m, el coeficiente de evaporación del nivel de evaporación es similar. Por lo tanto, las mismas características de variación de los dos tipos de suelo son que el coeficiente de evaporación del agua freática disminuye con el aumento de la profundidad del agua subterránea; las diferentes características son que los dos tipos de suelo tienen diferentes pendientes en sus reducciones de la tasa de evaporación en la profundidad enterrada poco profunda (0–1 m); es decir, la profundidad última es diferente.

Establecimiento modelo

Modelo cuantitativo de evaporación freática bajo condiciones sin lluvia

Las fórmulas empíricas existentes para la evaporación freática son las siguientes:

Los de averyanov ecuación (Parabólico Fórmula) (Aweliyongrufe ----):

$$P.ej\frac{1}{4}mi_0(1 - H=H_{\text{máximo}})_{\text{norte}} \quad (11)$$

La ecuación de Ye Shui-ting (fórmula exponencial) (S.M et al. ----):

$$P.ej\frac{1}{4}mi_0mi-ah \quad (12)$$

La ecuación de Zhang Chaoxing (Jin y Zhang ----):

$$P.ej\frac{1}{4}mi_0un = (H_{\text{pNORTE}})_b \quad (13)$$

La ecuación de Shen Li-chang (Shen ----):

$$P.ej\frac{1}{4}kuE_{a0}=(H_{\text{p1}})_b \quad (14)$$

La ecuación de Tsinghua (leyet al. ----):

$$mi_{\text{gramo}}\frac{1}{4}mi_{\text{máximo}}(1 - mi_{\text{nordeste}}=E_{\text{máximo}}) \quad (15)$$

Algunos investigadores creen (zhanget al. ----) que una 'profundidad de extinción' o 'profundidad de corte' para la evaporación freática – más allá del cual cesa la evaporación del agua freática – en realidad no existe en teoría. No importa cuán profunda sea la profundidad enterrada del agua freática, siempre que exista un gradiente de potencial hídrico entre cualquier punto de la zona no saturada y la superficie freática, habrá una transformación de la zona freática a la zona no saturada superior. Otros estudios (Espigaet al. ----) muestran que cuando la profundidad enterrada del nivel freático (la profundidad del nivel freático) es cero, el coeficiente de evaporación freática no debe estar relacionado con la evaporación de la superficie del agua o las texturas del suelo, acercándose a un nivel estable alrededor de uno. Además, el estudio anterior de la ley de evaporación freática muestra que la relación entre el coeficiente de evaporación freática y la profundidad del enterramiento no es una relación lineal única sino que está estrechamente relacionada con la capacidad de evaporación. Por lo tanto, se necesita un método más eficiente y práctico para calcular la evaporación freática. En este artículo, se ha introducido y mejorado un nuevo modelo de cálculo para la evaporación freática en condiciones sin lluvia basado en la fórmula exponencial de Ye-Shuiting.

De acuerdo con la relación entre el coeficiente de evaporación freática y la evaporación de la superficie del agua discutida anteriormente, se puede ver que el coeficiente de evaporación freática no solo está relacionado con la profundidad enterrada sino que también se ve afectado por varias superficies subyacentes. En consecuencia, este artículo mejora la fórmula exponencial de Ye-Shuiting y establece un nuevo modelo de cálculo para la evaporación freática en condiciones sin lluvia, como se muestra a continuación:

$$P.ej\frac{1}{4}mi_0mi-ah \quad (\text{discisió})$$

dónde $P.ej$ denota la intensidad de la evaporación freática (mm/d); mi es la intensidad de la evaporación freática (mm/d) cuando la profundidad del nivel freático es cero (un valor que generalmente se aproxima a la evaporación del agua superficial); Hes la profundidad del nivel freático (es decir, profundidad de la superficie freática o profundidad del agua subterránea freática, m) medida desde la superficie hasta el nivel freático; λ y α representan constantes empíricas.

Modelo de cálculo de la evaporación freática diaria en condiciones de lluvia

La evaporación del agua freática está influenciada principalmente por la intensidad de la evaporación atmosférica, la profundidad enterrada del agua subterránea freática y la textura del suelo. La evaporación de la superficie del agua es la forma concentrada de la evaporación atmosférica que se ve afectada por algunas condiciones meteorológicas, como la radiación solar, la temperatura, la humedad, la velocidad del viento, la presión del aire, etc.

En los días de lluvia, cuando no llueve, la radiación solar y la temperatura del aire disminuyen y la humedad aumenta, lo que se traduce en una disminución de la evaporación superficial del agua (es decir, la intensidad de la evaporación atmosférica). Mientras que durante el período de lluvia, no solo se reduce la intensidad de la evaporación atmosférica, sino que también se debilita la acción capilar debido al suplemento de agua del suelo por la precipitación (leyet al. ----), por lo que la evaporación freática se reduce de forma más evidente durante el período de lluvias. Sobre todo, podemos encontrar que el grado de reducción de la evaporación freática bajo condiciones de lluvia de la evaporación freática se ve afectado principalmente por la intensidad de la evaporación atmosférica, la profundidad enterrada del agua subterránea freática, la lluvia y la duración de la lluvia. En consecuencia, se puede establecer el siguiente modelo de cálculo de la evaporación freática en condiciones de lluvia.

$$P.ej\frac{1}{4}mi\frac{1}{2}mi-ah\frac{1}{2}pf(H, P, t) \quad (17)$$

dónde $f(H, P, h)$ representa la disminución de la evaporación freática causada por la precipitación, H es la profundidad del nivel freático o la profundidad de la superficie freática; P representa la lluvia, t representa la duración de la lluvia. Los demás parámetros tienen el mismo significado que los mencionados anteriormente.

El modelo para la evaporación freática bajo condiciones de lluvia se deduce de la siguiente manera. Primero, usando el modelo de cálculo de la evaporación freática bajo condiciones sin lluvia para calcular el valor estimado de la evaporación freática bajo condiciones de lluvia, y luego calculando la diferencia entre el valor estimado y el valor medido de la evaporación freática bajo condiciones de lluvia. Después de eso, se obtiene la reducción de la evaporación freática en condiciones de lluvia en relación con la de sin lluvia. En segundo lugar,

analizar la relación entre la reducción de la evaporación freática y la profundidad enterrada del agua subterránea freática, la lluvia y la duración de la lluvia, y luego establecer los modelos correspondientes, es decir, $f(H, P, t)$. Finalmente, combinando el modelo cuantitativo para la evaporación freática bajo condiciones sin lluvia y el modelo cuantitativo para la reducción de la evaporación freática, se establecen los modelos cuantitativos integrados para la evaporación freática bajo condiciones de lluvia.

De acuerdo con las fórmulas de cálculo establecidas de la evaporación freática en condiciones sin lluvia, a saber, las fórmulas (16), podemos calcular los valores estimados de la evaporación freática en condiciones de lluvia en suelo negro de concreción calcárea y suelo fluvo-acuático por separado de 1993 a 2015 y obtener la reducción de la evaporación freática calculando la diferencia entre los valores estimados y sus correspondientes valores medidos. La relación entre la reducción de la evaporación freática y la profundidad enterrada del agua subterránea freática, el nivel de lluvia y la duración de la lluvia en el suelo negro de concreción de cal se analiza por separado y los resultados correspondientes se muestran en Figuras 5-7. Además, la relación entre la reducción de la evaporación freática y la profundidad enterrada del agua subterránea freática, el nivel de lluvia y la duración de la lluvia en el suelo fluvoacuático se analiza por separado y los resultados correspondientes se muestran en Figuras 8-10.

De Figura 5, se puede observar que la reducción de la evaporación freática en el suelo negro de concreción caliza aumenta con la profundidad y la tendencia se ralentiza hasta aproximarse a cero. También podemos encontrar que la reducción de la evaporación freática es básicamente cero cuando la profundidad es de 0,8 m.

Figura 6 muestra la reducción de la evaporación freática en la concreción de cal. El suelo negro disminuye cuando aumenta la lluvia. Cuando el nivel freático es poco profundo, la reducción de la evaporación freática disminuye linealmente con el aumento de los niveles de lluvia. Cuanto menor sea la profundidad enterrada, más evidente será la tendencia decreciente. Cuando la profundidad enterrada alcanza una cierta profundidad más profunda, la reducción de la evaporación freática ya no se ve afectada por el nivel de lluvia. Las explicaciones de estos fenómenos anteriores son las siguientes; es porque cuando la profundidad enterrada de la capa freática es poco profunda, la lluvia puede inhibir directamente la evaporación freática. Con el aumento de la profundidad, el agua en la zona freática aún migra a los poros superiores del suelo en las zonas no saturadas.

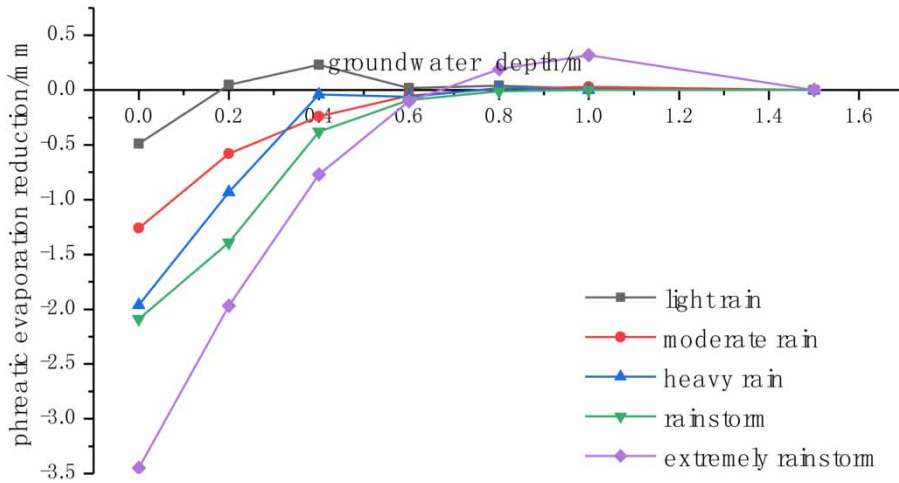


Figura 5 | Relación entre la reducción de la evaporación freática y la profundidad del nivel freático (freático) en suelo negro.

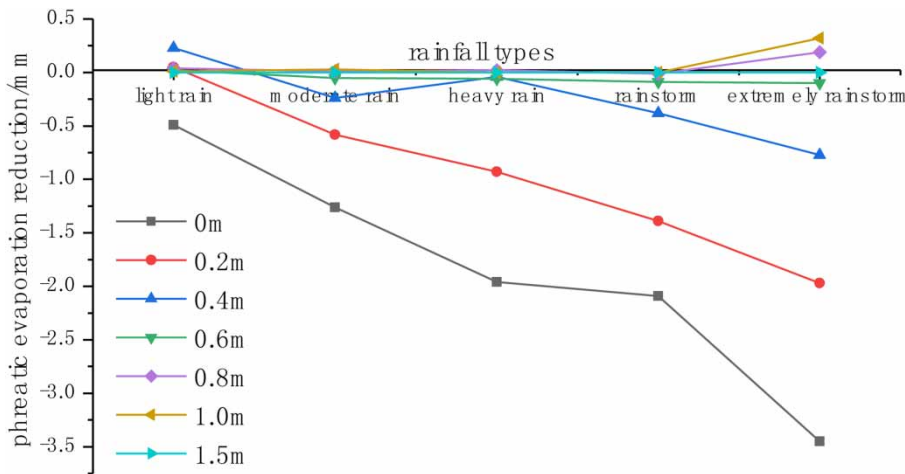


Figura 6 | Relación entre la reducción de la evaporación freática y la precipitación en suelo negro.

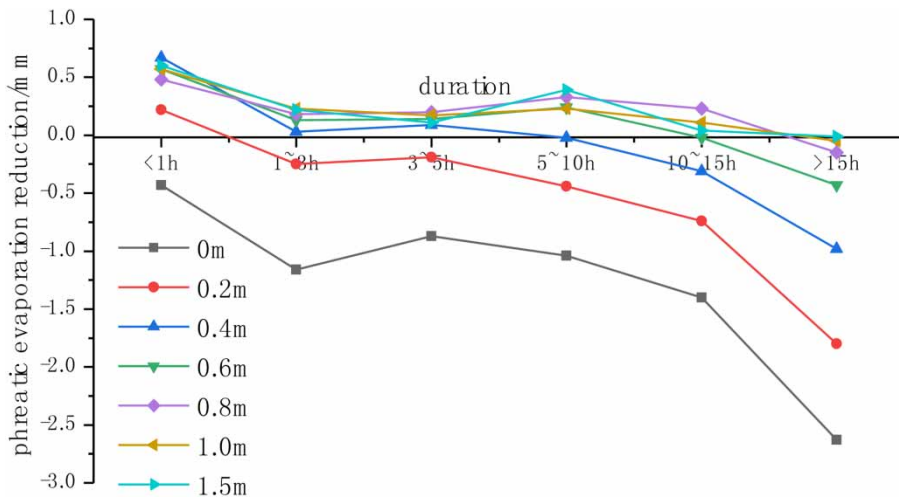


Figura 7 | Relación entre la reducción de la evaporación freática y la duración de la lluvia en suelo negro.

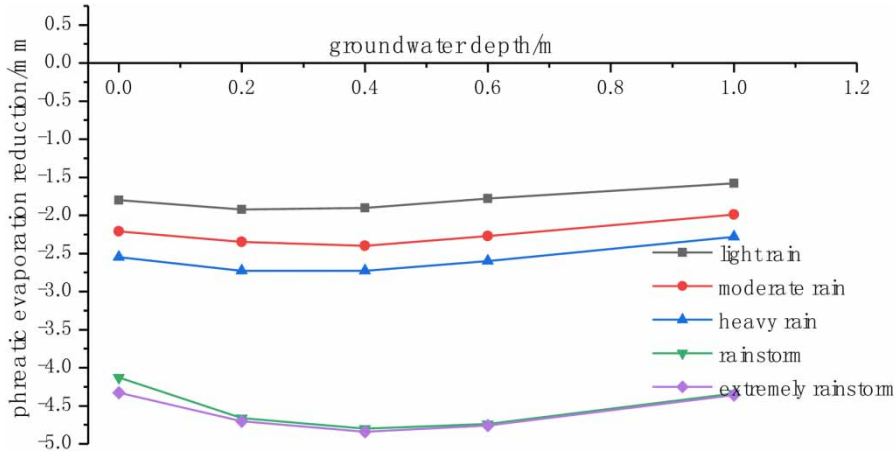


Figura 8 | Relación entre la reducción de la evaporación freática y la profundidad del nivel freático (freático) en suelos fluvo-acuáticos.

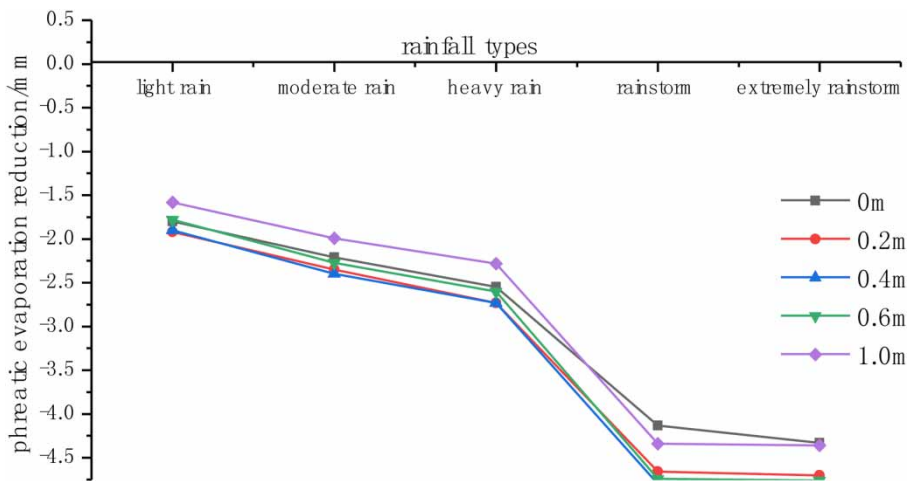


Figura 9 | Relación entre la reducción de la evaporación freática y la precipitación en suelos fluvo-acuáticos.

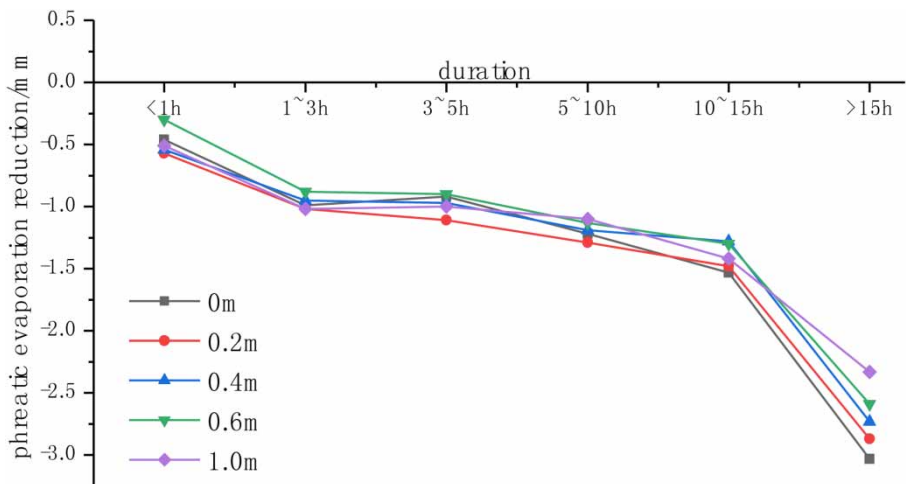


Figura 10 | Relación entre la reducción de la evaporación freática y la duración de las precipitaciones en suelos fluvoacuáticos.

por acción capilar antes de que la lluvia se infiltre en esa capa. Hay poca diferencia entre la evaporación freática bajo condiciones de lluvia o no; es decir, la lluvia es menos inhibidora de la evaporación freática.

Como se muestra en [Figura 7](#), la disminución de la evaporación freática en el suelo negro de concreción de cal disminuye progresivamente con el aumento de la duración de la lluvia en forma de S invertida. Esto se debe a que cuanto más dura la lluvia, mayor es la cantidad de lluvia que se infiltra en la zona vadosa y mayor es el efecto de inhibición de la evaporación freática.

[Figura 8](#) demuestra que la reducción de la evaporación freática en suelos fluvo-acuáticos decrece primero y luego aumenta con la profundidad, alcanzando un mínimo cuando la profundidad es de 0,4 m. Podemos encontrar que la ley de la evaporación freática varía con la profundidad enterrada en el suelo fluvo-acuático y no es consistente con la del suelo negro de concreción de cal. Esto se debe a que tienen diferentes tasas de infiltración debido a las texturas únicas de su suelo. En comparación con el suelo negro de concreción de cal, existen partículas de suelo más gruesas y una mayor porosidad del suelo en la capa superficial de suelo fluvo-acuático donde la lluvia puede infiltrarse en la zona vadosa más rápidamente al principio. Pero, a medida que aumenta la profundidad, los poros del suelo se vuelven más pequeños y la infiltración de lluvia se hace más lenta. Finalmente, el agua se acumula a 0,4 m de profundidad, lo que minimiza la evaporación freática.

De [Figuras 9 y 10](#), podemos encontrar que la ley de la evaporación freática varía con el nivel de lluvia y la duración de la lluvia; aún así, las tendencias son consistentes en ambos tipos de suelo.

De acuerdo con el análisis anterior, los modelos cuantitativos (como se muestra a continuación) establecen la cantidad por la cual la reducción de la evaporación freática varía con la profundidad enterrada del agua subterránea freática, la lluvia y la duración de la lluvia en el suelo negro de concreción de cal y el suelo fluvoacuático, respectivamente.

Para suelo negro de concreción de cal:

$$f(H, P, t) = \frac{1}{(H \cdot P)^{0.493}} \frac{AP_b}{c - de \cdot \lambda t} \quad (18)$$

Para suelos fluvo-acuáticos:

$$f(H, P, t) = \frac{1}{m(H - l)^{2.69H}} \frac{AP_b}{c - de \cdot \lambda t} \quad (19)$$

donde $f(H, P, t)$ representa la disminución de la evaporación freática provocada por la precipitación, H es la profundidad del nivel freático

o profundidad de la superficie freática; P representa la lluvia, t representa la duración de la lluvia y n , segundo, c , re , metro, l , norte, λ son constantes empíricas.

solución modelo

De acuerdo con los datos diarios sobre la evaporación freática en condiciones sin lluvia y la evaporación superficial del agua en suelo negro de concreción de cal y suelo fluvoacuático de 1993 a 2015, la expresión específica de la evaporación freática en condiciones sin lluvia para dos suelos típicos es la siguiente. Para suelo negro de concreción de cal:

$$P_e = \frac{1}{(H \cdot P)^{0.493}} \frac{AP_b}{c - de \cdot \lambda t} \quad (20)$$

Para suelos fluvo-acuáticos:

$$P_e = \frac{1}{m(H - l)^{2.69H}} \frac{AP_b}{c - de \cdot \lambda t} \quad (21)$$

Con base en los datos de reducción de la evaporación freática, profundidad enterrada del agua subterránea freática, lluvia y duración de la lluvia de 1993 a 2015, se obtienen dos expresiones específicas de reducción de la evaporación freática en dos tipos de suelos ajustando las fórmulas (18) y (19) con MATLAB, como se muestra a continuación.

Para suelo negro de concreción de cal:

$$f(H, P, t) = \frac{1}{(H \cdot P)^{0.493}} \frac{-0.48PAGS_0.32}{0.4 - 1.49mi \cdot 0.04t} \quad (22)$$

Para suelos fluvo-acuáticos:

$$f(H, P, t) = \frac{1}{7.47(H - 0.44)^{2.69H}} \frac{-3.4PAGS_0.29}{0.3 - 2.98mi \cdot 0.06t} \quad (23)$$

Verificación del modelo

Índice de ajuste del modelo

Los resultados de ajuste del modelo cuantitativo de evaporación freática en condiciones sin lluvia y con lluvia se muestran en [Tabla 2](#).

Tabla 2 | Resultados de la evaluación del modelo

Situación	Tipo de suelo	MAE	RMSE	R ₂
Sin lluvia	Concreción calcárea Suelo negro	0.52	0.51	0.81
	Suelo fluyoacuico	0.42	0.37	0.89
Lluvioso	Concreción calcárea Suelo negro	0.23	0.37	0.82
	Suelo fluyoacuico	0.27	0.51	0.85

De acuerdo con los resultados, los métodos discutidos anteriormente muestran mejores resultados de ajuste. Combinando el modelo cuantitativo de evaporación freática en condiciones sin lluvia y el modelo cuantitativo de reducción de la evaporación freática, se establecen finalmente los modelos cuantitativos integrados de evaporación freática en condiciones de lluvia para dos tipos de suelos (suelo negro de concreción calcárea y suelo fluyoacuático), como mostrado a continuación.

Para suelo negro de concreción de cal:

$$P_{ej} = \frac{1}{(H-0.4)^{0.93}} \cdot \frac{-0.48PAGS^{0.32}}{0.4 - 1.49mi - 0.04t} \quad (24)$$

Para suelos fluyo-acuáticos:

$$P_{ej} = \frac{1}{7.47(H-0.44)^{2p18:24}} \cdot \frac{-3.4PAGS^{0.29}}{0.3 - 2.98mi - 0.06t} \quad (25)$$

Índice de predicción del modelo

Los datos medidos de 2018 se utilizaron para probar el efecto predictivo del modelo cuantitativo de evaporación freática en condiciones de lluvia en suelo negro de concreción de cal y suelo fluyoacuático. Cuando la profundidad enterrada del nivel freático es poco profunda, la evaporación freática es más obvia. Por lo tanto, tomamos la profundidad enterrada de 0 m y 0,2 m como ejemplo para comparar los valores predichos y medidos realmente de la evaporación freática bajo condiciones de lluvia en suelo negro de concreción de cal y suelo fluyo-acuático. Los resultados de la comparación se muestran en Figuras 11 y 12. De la figura, podemos ver que no hay mucha diferencia entre el valor estimado y el valor medido excepto por algunos puntos anormales. Los resultados de la evaluación de la evaporación freática a diferentes profundidades en suelo negro de concreción de cal y suelo Fluyoquic se ilustran en Tabla 3. Esto demuestra que la capacidad predictiva y los resultados del modelo cuantitativo modificado de evaporación freática a diferentes profundidades en dos tipos de suelos son mejores.

En resumen, las siguientes fórmulas se pueden utilizar para calcular la evaporación freática en la llanura de Huaibei en China. Las aplicaciones en otras áreas pueden requerir alteraciones significativas de los cálculos. Tipos de suelo muy similares pueden encontrar útil este modelo cuantitativo modificado para aproximaciones.

Modelo cuantitativo de evaporación freática bajo condiciones sin lluvia en suelo negro de concreción de cal:

$$P_{ej} = \frac{1}{7.47(H-0.44)^{2p18:24}} \cdot \frac{-3.4PAGS^{0.29}}{0.3 - 2.98mi - 0.06t} \quad (25)$$

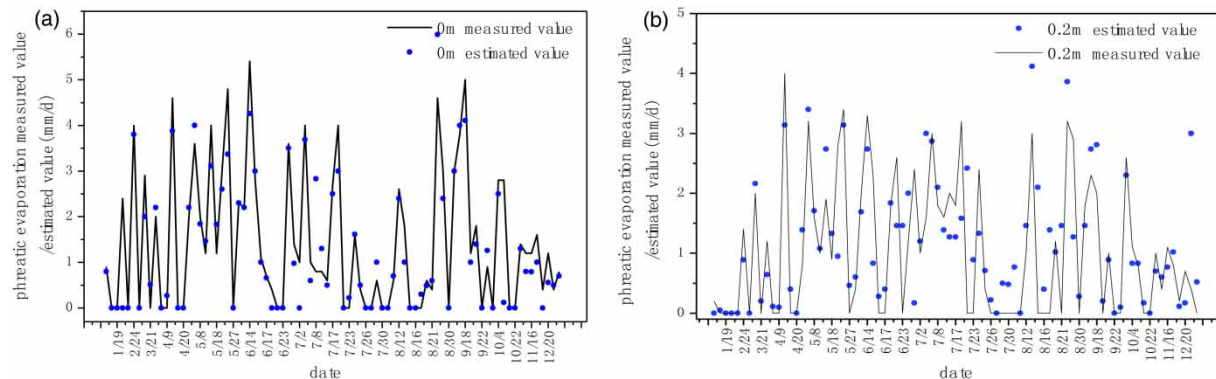


Figura 11 | Comparación de los valores pronosticados y medidos de la evaporación freática bajo condiciones de lluvia en suelo negro de concreción de cal desde (a) profundidad 0 m (b) profundidad 0,2 metros

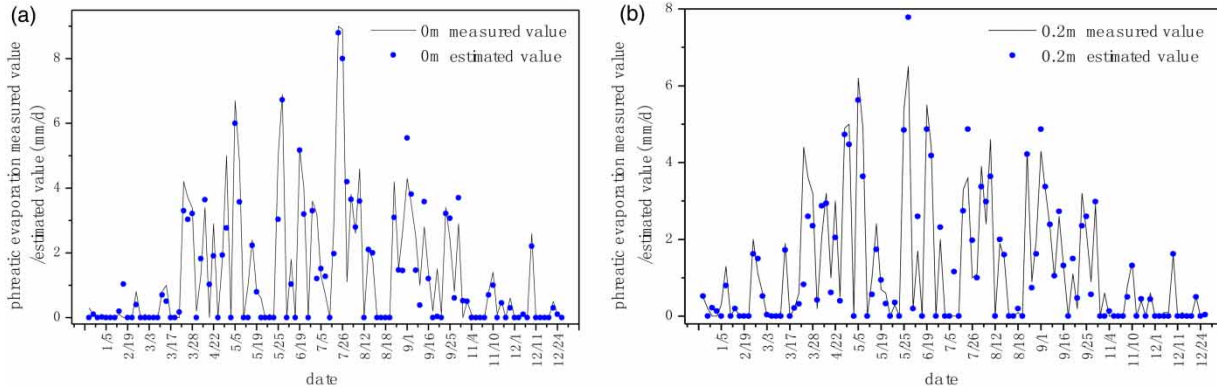


Figura 12 | Comparación de los valores pronosticados y medidos de la evaporación freática bajo condiciones de lluvia en suelo Fluyo-aquic desde (a) profundidad 0 m (b) profundidad 0,2 metros

Tabla 3 | Resultados de la evaluación del modelo

Tipo de suelo	concreción de cal suelo negro		suelo fluyoacuico	
	0 metros	0.2 metros	0 metros	0.2 metros
Profundidad del agua subterránea freática				
MAE	0.36	0.55	0.36	0.28
RMSE	0.63	0.82	0.65	0.53
R2	0.89	0.82	0.86	0.81

Modelo matemático de evaporación freática bajo condiciones de lluvia en suelo negro de concreción de cal:

$$P_e = \frac{1}{(H_p + 1)^{0.93}} \cdot \frac{-0.48PAGS_0.32}{0.4 - 1.49m_i - 0.04t} \quad (27)$$

Modelo de evaporación freática en condiciones sin lluvia en suelo Fluyo-aquic:

$$P_e = \frac{1}{(H_p + 1)^{0.29H}} \quad (28)$$

Ecuaciones que gobiernan la evaporación freática en condiciones sin lluvia en suelos fluyoacuáticos:

$$P_e = \frac{1}{\frac{-3.4PAGS_0.29}{0.3 - 2.98m_i - 0.06t} + 7.47(H - 0.44)^{2.18} + 24} \quad (29)$$

donde P_e denota la intensidad de la evaporación freática (mm/d); m_i es la intensidad de la evaporación freática (mm/d) cuando la profundidad del nivel freático es cero (un valor que generalmente se aproxima

evaporación del agua superficial); H es la profundidad del nivel freático (es decir, la profundidad de la superficie freática o la profundidad enterrada del agua freática subterránea) (m); $PAGS$ representa la precipitación (mm), t representa la duración de la lluvia (h).

CONCLUSIONES

Este artículo analizó la ley y los mecanismos de la evaporación freática y las tendencias que involucran la profundidad de la capa freática y la evaporación del agua superficial. Para revelar las leyes, los mecanismos y las ecuaciones que rigen la evaporación freática, investigamos cómo la profundidad de la superficie freática y la evaporación del agua superficial influyeron en la magnitud de la evaporación freática y su coeficiente.

A la misma profundidad enterrada, la evaporación freática aumentó con un aumento en la evaporación del agua superficial. Cuando la evaporación del agua superficial aumentó hasta cierto punto, la evaporación freática tendió a un cierto valor límite en consecuencia. Bajo las mismas condiciones de evaporación del agua superficial, la evaporación freática disminuyó gradualmente al aumentar la profundidad. Cuanto mayor es la evaporación de la superficie del agua, más intensa es la tendencia de disminución de la evaporación freática con la profundidad. El coeficiente de evaporación freática no tuvo relación con la profundidad. El coeficiente de evaporación freática varió con la profundidad del nivel freático y fue influenciado por diferentes niveles de evaporación del agua superficial.

Se mejoró la fórmula empírica existente de evaporación freática y se establecieron los modelos de cálculo exponencial de evaporación freática en condiciones sin lluvia para suelo negro de concreción calcárea y suelo fluyoacuático.

Con base en el modelo, podríamos calcular el valor estimado de la evaporación freática bajo condiciones de lluvia y luego calcular la diferencia entre el valor estimado y el valor medido. Después de eso, se obtuvo la reducción de la evaporación freática en condiciones de lluvia en relación con los días sin lluvia.

Se identificó la relación entre la disminución de la evaporación freática y la profundidad enterrada del agua subterránea freática, la lluvia y la duración de la lluvia. La reducción de la evaporación freática en el suelo negro de concreción de cal aumentó con la profundidad, y la tendencia creciente se desaceleró hasta acercarse a cero. La reducción de la evaporación freática en el suelo Fluyo-aquic disminuyó primero y luego aumentó con la profundidad, alcanzando el valor mínimo a una profundidad de 0,4 m. La evaporación freática disminuyó en dos texturas de suelo diferentes con niveles crecientes de lluvia y disminuyó con un aumento en la duración de la lluvia en forma de S invertida.

Con base en la relación entre la reducción de la evaporación freática y la profundidad del agua subterránea freática, la precipitación y el nivel de precipitación, se establecieron los modelos de evaporación freática para suelo negro de concreción calcárea y suelo fluvoacuático. Combinando el modelo de evaporación freática bajo condiciones sin lluvia y el modelo de reducción de la evaporación freática, se establecieron los modelos integrados de evaporación freática bajo condiciones de lluvia para dos texturas de suelo diferentes. Como resultado del ajuste y la modificación del modelo, el modelo presentado puede mejorar la precisión del cálculo de la evaporación freática y las predicciones futuras.

Con base en los datos medidos recopilados por el lisímetro, en este artículo se propusieron modelos de evaporación freática bajo condiciones de lluvia y sin lluvia. Estas funciones mejoradas se pueden utilizar para calcular la evaporación freática con un mayor grado de precisión en las condiciones explicadas en este documento. Es de gran importancia seguir estudiando y perfeccionando los modelos de evaporación freática

– especialmente, en lo que se refiere a la agricultura en tierras de cultivo y campos de cultivo tanto en períodos lluviosos como sin lluvia.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por la Fundación Nacional de Ciencias de la Naturaleza de China, número de subvención 41830752 y

41971042. Los autores desean agradecer a la Estación Experimental Hidrológica de Wudaogou por colaborar en el suministro de los datos y la información utilizada en este estudio.

DECLARACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos no pueden ponerse a disposición del público; los lectores deben ponerse en contacto con el autor correspondiente para obtener más detalles.

REFERENCIAS

- Aweliyongrube, B. ----Las Instalaciones de Drenaje de Nivel para el Control de la Irrigación Salinización. China Industry Press, Pekín, págs. 56–61.
- Jin, GY y Zhang, CX ----El Análisis y la Investigación al Ley de evaporación freática. China Water Power Press, Pekín, págs. 169–181.
- Johnson, E., Yáñez, J., Ortiz, C. & Muñoz, J. ----Evaporación de aguas subterráneas poco profundas en cuencas cerradas en el Altiplano chileno. Revista de Ciencias Hidrológicas 55, 624–635. Lei, ZD, Yang, SX y Xie, SC, ----La Dinámica del Agua del Suelo. Diario de la Prensa de la Universidad de Tsinghua, Beijing.
- Liu, TG, Guo, DM, Chi, DC y Yu, WY ---- Experimental estudio sobre la evaporación freática en las condiciones de plantación en la llanura de Liaohé. Riego con ahorro de agua 2, 23–25. Liu, GL, Cui, YL & Feng, YH ---- Estudio sobre derecho y método de cálculo de la evaporación de buceo en el Distrito de Irrigación del Río Amarillo. Revista de Riego y Drenaje 30 (03), 18–22 p33.
- Marazuela, MA, Vázquez-Suñé, E., Custodio, E., Palma, T., García-Gil, A. & Ayora, C. ----Mapeo 3D, hidrodinámica y modelado de la zona de mezcla agua dulce-salmuera en salares similares al Salar de Atacama (Chile). J. Hydrol. 561, 223–235.
- Marazuela, MA, Vázquez-Suñé, E., Ayora, C., García-Gil, A. & Palma, T. ----El efecto del bombeo de salmuera en la hidrodinámica natural del Salar de Atacama: la capacidad amortiguadora de los salares. Ciencia del Medio Ambiente Total 654, 1118–1131.
- Marazuela, MA, Vázquez-Suñé, E., Ayora, C. & García-Gil, A. ----Hacia una extracción de salmuera más sostenible en los salares: aprendiendo del Salar de Atacama. Ciencia del Medio Ambiente Total 703, 135605.
- Muñoz-Pardo, JF, Ortiz-Astete, CA, Mardones-Pérez, L. & Vidts-Sabelle, P. ---- Funcionamiento hidrogeológico del acuífero del núcleo del salar de Atacama, Chile. En g. Hidráulica en México XIX, 69–81.
- Felipe, JR ----La evaporación y los campos de humedad y calor en el suelo. J. Meteorol 14, 354–366.

- Shen, LC ---- El estudio empírico de la evaporación freática fórmula.El Diario de Ingeniería Hidráulica (7), 34–40. Tang, H.-x., Su, Y.-s. y Zhang, H.-p. ---- Estudio experimental de evaporación freática y mejora de la fórmula empírica. Diario de Ingeniería Hidráulica 10,37–44.
- Tyler, SW, Muñoz, JF y Wood, WW ----[la respuesta de Hidráulica y mineralogía de Playa y Sabkha frente al forzamiento climático](#).agua subterránea 44 (3), 329–338.
- Ye, ST, Shi, XM & Miao, XF ---- El análisis del rendimiento de agua por el cálculo de la fórmula empírica de la evaporación freática. Hidrogeología y la Ingeniería Geológica (4), 46–48.
- Yu, HL, Jiang, F. & Su, H. ---- Discusión sobre la influencia de factores meteorológicos en la evaporación del buceo. Tecnología de aplicación de conservación de suelos y agua (3), 24–25. Zhang, YM, Hu, SJ, Zhai, LX y Shen, B. ---- Cálculo modelo de evaporación en suelo desnudo en la cuenca del Tarim. Transacciones de la Sociedad China de Ingeniería Agrícola 25 (1), 27–32.
- Zhu, XZ, Cui, YL, Li, YH, Zhang, ZC y Feng, YH ---- Estudio experimental sobre la evaporación freática en la llanura oriental de la provincia de Henan. Agua rural y energía hidroeléctrica de China (3), 1–8.

Recibido por primera vez el 2 de febrero de 2020; aceptado en forma revisada el 12 de junio de 2020. Disponible en línea el 7 de julio de 2020