

DOI: 10.11766/trxb202103150143

陆蕴青, 向伟, 李敏, 司炳成. 黄土塬区土地利用变化对地表蒸散的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60(1): 89–98.

LU Yunqing, XIANG Wei, LI Min, SI Bingcheng. Effects of Land Use Change on Evapotranspiration in The Loess Tableland[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(1): 89–98.

黄土塬区土地利用变化对地表蒸散的影响*

陆蕴青¹, 向伟¹, 李敏^{1†}, 司炳成^{1, 2}

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100; 2. 鲁东大学资源与环境工程学院, 山东烟台 264000)

摘要: 明确黄土高原地表蒸散对土地利用变化的响应, 有助于评估退耕还林/还草工程对区域气候的影响。为此, 在陕西长武黄土塬区 5 个地点分别采集农地和 20 龄苹果园 10 m 深土壤剖面样品, 测定土壤水分和氯离子含量, 结合当地 22 龄苹果园 4~18 m 土壤水分历史数据, 基于空间换时间的方法定量评估农地转化为苹果园后对地表蒸散的影响。结果表明: (1) 由农地转化的 20 龄苹果园 4~10 m 土壤水分明显减小, 仅为农地的 71%; (2) 农地对地下水的平均潜在补给量和地表蒸散量分别为 $57 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $527 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 分别占年均降水量的 10% 和 90%; (3) 农地转化为苹果园后地表蒸散量增加, 22 龄苹果园平均蒸散量为 $625 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 相比农地增加量为 $98 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 其中 4~10 m 和 4~18 m 深层土壤水分别贡献了 $24 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $41 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 约占总蒸散量的 4% 和 7%。本文首次定量评估了黄土高原地区农地转化为苹果园对地表蒸散的影响以及深层土壤水对深根系苹果树蒸散的贡献, 为评价该区域土地利用变化对蒸散以及气候的影响提供科学依据。

关键词: 土地利用变化; 地表蒸散; 深层土壤水; 氯离子质量平衡; 黄土高原

中图分类号: S162.5 文献标志码: A

Effects of Land Use Change on Evapotranspiration in the Loess Tableland

LU Yunqing¹, XIANG Wei¹, LI Min^{1†}, SI Bingcheng^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. School of Resource and Environmental Engineering, University of Ludong, Yantai, Shandong 264000, China)

Abstract: 【Objective】 Studying the response of evapotranspiration to land use change in Chinese Loess Plateau (CLP) is of great significance to clarify the effects of the Grain for Green Project on regional climate. Many studies have focused on the temporal trend or spatial distribution of reference evapotranspiration based on meteorological or satellite data at the watershed or regional scales. However, these studies cannot reflect the actual situation of the impact of land use change on surface evapotranspiration. Thus, the quantitative evaluation of actual evapotranspiration at the stand scale is lacking. Therefore, the objective of this study is to evaluate the effects of conversion from cultivated farmland into apple orchard on the actual evapotranspiration. 【Method】 A paired experimental study was conducted at the Changwu Tableland, south of the CLP. Both the

* 国家自然科学基金项目 (41601222, 41630860, 41877017) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41601222, 41630860, 41877017)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: limin2016@nwfafu.edu.cn

作者简介: 陆蕴青 (1997—), 硕士研究生, 主要从事生态水文方面的研究。Email: 635445745@qq.com

收稿日期: 2021-03-15; 收到修改稿日期: 2021-12-02; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2022-03-10

cultivated farmlands and 20-year-old apple orchards were sampled with a soil auger (0.06 m in diameter) at 0.2 m intervals at each of the five selected sites, with a total of 10 deep soil cores (10 m). The volumetric soil water content was calculated by mass water content and soil bulk density, and the chloride concentrations of soil water were measured by extraction method. Since the local apple orchards were all converted from cultivated farmlands and the soil texture is uniform, the space-for-time method was applied. As precipitation is the only source of water for local crops, the chlorine mass balance method can be used to estimate groundwater recharge. Therefore, the surface evapotranspiration can be estimated by combining soil water mass balance with chloride mass balance. 【Result】 The results show that the averaged soil water content of 4 ~ 10 m soil layer in 20-year-old apple orchard was $0.20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. This was significantly lower than that in farmland ($0.28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) and implies that soil water content were obviously affected by deep root after cultivated farmland converted into apple orchard 20 years ago. The long-term averaged groundwater recharge rate was $57 \pm 13.5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ in cultivated farmlands, which resulted in the actual evapotranspiration of $527 \pm 13.5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ and accounting for $90 \pm 2.3\%$ of the annual precipitation. After cultivated farmland converted into 20-year-old apple orchard, the actual evapotranspiration significantly increased, with an average of $625 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, accounting for 107% of the annual precipitation. Compared to cultivated farmlands, the actual evapotranspiration, in total, increased 1960 mm in 20-year-old apple orchard from 20 years ago, with an annual average of 98 mm. Within the 20-year-old apple orchards, soil water in 4 ~ 10 m, and 10 ~ 18 m soil layers contribute $24 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ (4%), and $41 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ (3%) to the annual evapotranspiration, respectively. 【Conclusion】 The small contributions of 4 ~ 10 m and 10 ~ 18 m soil layers indicated that the deep soil water (below 4 m) has an important role in evapotranspiration of the deep rooted apple tree. However, the main water sources for evapotranspiration still depend on the shallow soil water (0 ~ 4 m) that is easily recharged by the latest precipitation. This is the first study that quantitatively evaluated the impacts of cultivated farmland being converted into apple orchard on the evapotranspiration and the contribution of deep soil water to evapotranspiration. This study provides a scientific basis for evaluating the effects of land use change on the regional evapotranspiration and climate on the CLP and other regions with a significant land use/cover change.

Key words: Land use change; Evapotranspiration; Deep soil water; Chloride mass balance; the Loess Plateau

地表蒸散包括土壤物理蒸发和植物蒸腾,是驱动全球陆地水循环的主导过程^[1],对地表蒸散过程的精确推算真实反映人类活动对水文循环影响的重要前提和基础^[2]。地表蒸散的大小反映陆面过程中地-气相互作用的强度,与下垫面类型密切相关^[3],而土地利用/覆被变化显著地改变了下垫面类型,是影响地表蒸散的重要因素。土地利用/覆被变化引起的生态水文效应已成为当前全球变化研究领域的焦点问题^[4],它通过改变地表蒸散对区域气候进行反馈,直接或间接地影响地区气候^[5]。因此,定量评估地表蒸散对土地利用/覆被变化的响应是地区乃至全球气候变化研究的重要内容。

黄土高原生态脆弱,对气候变化和人类活动的影响较为敏感^[6]。近几十年来,该地区进行了大规模的水土保持建设、退耕还林还草生态恢复工程以及人工经济林草大面积种植,加之气候变化的影响,土地利用/覆被条件发生了巨大变化^[7]。目前,诸多学者在土地利用/覆被变化对土壤水分^[8]、土壤侵蚀^[9]、径流^[10]和地下水^[11-13]的影响等方面取得了显

著进展,但对受其影响最直接的地表蒸散方面研究较少。已有研究表明,黄土高原近40年蒸散因植被恢复整体呈上升趋势^[14],并通过增加地表蒸散对区域气候产生降温效应,减缓气温上升对黄土高原生态系统的影响^[5]。Feng等^[15]研究表明,2000—2012年黄土高原蒸散平均增加 $4.3 \pm 1.7 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,但低于利用水量平衡法的估算值 ($6.8 \pm 3.8 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$)。上述研究主要基于卫星资料或台站气象数据估计区域尺度潜在值,并非生态系统的实际蒸散,不能较好地反映立地条件下土地利用变化对地表蒸散影响的真实情况^[16]。

深层土壤水的生态水文效应逐渐成为黄土高原土壤水分研究的重点和热点问题^[17-18]。相对浅根农作物,深根植被通常具有较大的蒸散需求,年内降水和浅层土壤水无法满足植物的正常生长需要,从而提取深层土壤水^[19]。黄土高原普遍存在的深层土壤水干燥化(土壤干层)表明了深根植被对深层土壤水的利用^[8],部分学者也对深层土壤水在植物蒸腾中的贡献进行了量化^[20-22]。Zhang等^[20]通过测定

土壤剖面和 17 龄苹果果实中的氡浓度, 认为 4~15 m 的深层土壤水对果实的贡献约占 70%。刘柯渝等^[21]利用同位素手段得出 3~5 m 深层土壤水能够稳定地提供苹果树 30% 的蒸腾需求。以上研究说明, 深层土壤水对黄土高原深根植被蒸腾有重要贡献, 但受植被类型以及气候条件的影响仍存在较大的不确定性。因此, 需要进一步明确深层土壤水在不同生态系统中的作用。

近 30 年来, 黄土高原苹果产业得到了较大发展, 苹果园多由农地转化而来, 是黄土高原主要的土地利用变化之一。为此, 本文以黄土高原长武塬区为例, 基于农地和 20 龄果园土壤剖面土壤水分的含水率及其氯离子浓度, 定量评估由农地转化为苹果园对地表蒸散的影响以及深层土壤水对地表蒸散的贡献, 以期服务于黄土高原土地利用变化、退耕还林还草工程和植被恢复等生态建设的生态水文效应评估。

1 材料与方方法

1.1 研究区概况

研究区位于黄土高原南部的长武塬面(图 1), 地势平坦, 平均海拔 1 220 m。属温带半湿润大陆性季风气候, 年平均温度 9.5℃, 年平均降水量 584 mm (1957—2015 年)。降水年内分布不均, 7—9 月降水量占全年降水总量的 55% 以上, 且年际变化大。土壤为黑垆土, 成土母质为马兰黄土, 其黏粒含量超

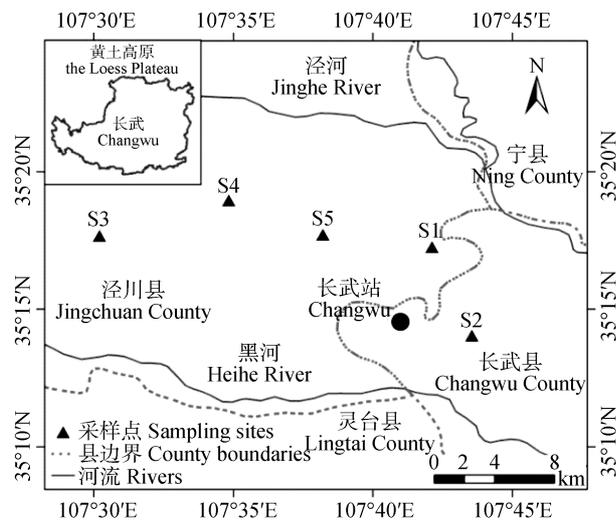


图 1 研究区地理位置及采样点分布

Fig. 1 The geographical location of the study area and the distribution of sampling sites

过 50%, 在起源上为风积型, 在水平方向上分布均匀。研究区域无灌溉条件, 为典型的雨养农业区。农地(冬小麦-夏玉米轮作)在苹果种植以前为当地典型的土地利用类型, 主要分布在塬面。1980 年代末开始, 大量农地转变为苹果园, 苹果园逐渐成为主要土地利用类型, 所有的果园和农地均由当地农民使用传统耕作技术管理。塬面地下水位多埋深 30~100 m, 为当地主要的生产生活水源。

1.2 样品采集与测定

2014 年 8 月, 在研究区 5 个地点(S1~S5, 下同)分别选择相邻(间距不超过 50 m)的农地和 20 龄苹果园(图 1), 共采集 10 个 10 m 深的土壤剖面。土样采集采用人工土钻法, 取样间隔为 20 cm。每个新鲜土壤样品混合均匀后, 取 30~40 g 装入铝盒带回实验室用于烘干法测定土壤质量含水率, 并转化为体积含水率, 公式如下:

$$\theta_v = \theta_m \times \rho_b \times 100\% \quad (1)$$

式中, θ_v 为体积含水率, $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$; θ_m 为质量含水率, $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$; ρ_b 为土壤容重(环刀法), $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

称取 5 g 烘干土样于 50 mL 离心管中, 加入 25 mL 超纯水(18.25 MΩ·cm)置于恒温振荡机上振荡 1 h, 转速为 180 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$, 随后用低速离心机离心 15 min (4 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$), 取上清液过 0.45 μm 滤头和 RP 活化柱以去除大分子有机物, 利用 IC 离子色谱仪(Dionex, ICS-1100, 美国)进行氯离子测定, 随后转化成土壤氯离子浓度。

此外, 长武塬区降水多年平均氯离子浓度^[23]、17 龄苹果园氡剖面数据^[20]、22 龄苹果园 0~18 m 土壤剖面水分数据^[23]从已发表的文献中获取。

1.3 数据分析

1.3.1 农地地表蒸散 长武塬面地势平坦, 地表径流较小; 塬面黄土层厚度大于 100 m, 地下水水位埋深超过 30 m^[24], 依靠土壤毛管作用对浅层土壤水分的补给量可忽略不计, 而降水可能通过活塞流或优势流向下运移补给地下水; 因此, 当地土壤水分平衡为^[23]:

$$P = ET_F + R_F + \Delta S_F \quad (2)$$

式中, P 为降水量, $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$; ET_F 为农地地表蒸散,

$\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$; R_F 为农地潜在地下水补给量 (或农地深层渗漏量, 表示未来可能的农地对地下水的补给量), $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$; ΔS_F 为农地土壤储水变化量, $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 。研究表明, 研究区农地深层土壤水分基本长期保持稳定^[25], 而浅层土壤水分年际变化不显著, 因此, 可忽略式 (2) 中农地土壤储水变化并简化为:

$$EF_F = P - R_F \quad (3)$$

式中, 年平均降水量 P 使用长武试验站自动气象站资料, 农地多年平均潜在地下水补给量 R_F 可根据氯离子质量平衡法求得。该方法假设在无外源输入的情况下, 大气降水输入的氯离子量与通过潜在地下水补给离开土壤的氯离子量保持质量平衡^[26], 从而可求得潜在地下水补给量:

$$R_F = \frac{P \times Cl_P}{Cl_{sw}} \quad (4)$$

式中, Cl_P 为降水输入的多年平均氯离子浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; Cl_{sw} 为植物根系带之下稳定的土壤水氯离子浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。氯离子质量平衡法适用于干旱和半干旱地区潜在地下水补给量的计算^[27], 在黄土高原已经得到了广泛地验证和运用^[11-12, 23, 28], 可获得长期平均潜在地下水补给量。长武塬区是典型的雨养农业, 无灌溉, 氯离子仅由降水 (干沉降和湿沉降) 输入, 降水多年平均氯离子浓度为 $1.2 \pm 0.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[23]。

1.3.2 苹果园地表蒸散 苹果园地表蒸散可以通过空间换时间的方法与农地对比求得, 这是由于农地种植的作物均为浅根植被, 根系深度一般在 0~2 m, 主要影响浅层土壤水分, 深层土壤水分能够保持长期稳定^[25]。此外, 由于取样点均位于平坦的塬面, 苹果园之前的土地利用方式均为农地, 土壤质地水平上均匀分布, 气候条件在长时间尺度下未发生剧烈变化且当地农民均采用相同耕作管理技术, 所以可将目前各取样点农地深层土壤水分状况视作对应苹果园转化前的状态。降水中的氡含量在自然状态下处于较低水平。1963 年前后是全球核爆实验最集中的年份, 当年降水含有最高浓度的氡, 而 1963 年之后的降水中的氡含量随着时间的推移逐渐下降并恢复至自然水平, 因此, 氡峰值深度代表了 1963 年的降水在过去 50 年 (取样时间 2014 年) 在土壤中的运行距离。黄土高原深厚的土壤剖面中有清晰

可见的、具有单个峰值的氡剖面, 表明土壤水分运动以活塞流形式为主^[20, 29], 所以可通过氡剖面判断降水在土壤中的运移情况。

长武塬区 17 龄苹果树下土壤水氡在 4~10 m 土层有明显的累积, 在 0~4 m 和 10~15 m 土层基本相同且浓度较低 (图 2), 说明 4~10 m 层土壤水含量反映了 1963 年前后含高浓度氡的降水, 而 0~4 m 土壤水不受含高浓度氡降水的影响, 并处于自然水平。我国大部分地区大气降水中氡浓度在 20 世纪 90 年代基本恢复到自然水平^[30], 因此, 本研究将更多反映近 20 年降水的 0~4 m 作为浅层土壤, 4 m 以下划分为深层土壤。此外, 各对应取样点距离不超过 50 m 且当地土壤均质化明显, 可忽略空间异质性认为土地利用变化是农地转化为苹果园后深层土壤储水量变化的主要原因。在此情景下, 与农地类似, 20 龄苹果园土壤水量平衡可忽略地表径流和地下水对土壤水分的补给, 且可作如下两个重要假设:

- (1) 近 20 年的降水被苹果园强烈蒸散所消耗, 无法对 4 m 以下的土壤水形成有效补给;
- (2) 农地转变为苹果园后, 4m 以下根区土壤储水量的变化是由苹果园的蒸散所造成的。

因此, 苹果园土壤水量平衡为:

$$ET_A = P + \frac{\Delta S_{F-A}}{T} = P + \frac{S_F - S_A}{T} \quad (5)$$

式中, ET_A 为苹果园地表蒸散量, $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$; ΔS_{F-A} 为农地与 20 龄苹果园 4 m 以下土壤储水量的差值, mm ; S_F 和 S_A 分别为农地和苹果园土壤水分储量, mm ; T 为苹果树的树龄, a 。其中, 土壤储水量 S 计算公式如下:

$$S = 1000 \int_{z_1}^{z_2} \theta_i dz \quad (6)$$

式中, Z 为土壤深度, m ; θ_i 为第 i 层土壤体积含水量, $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ 。

2 结果

2.1 农地和 20 龄苹果园深剖面土壤水分特征

农地和 20 龄苹果园土壤水分呈现两种不同的

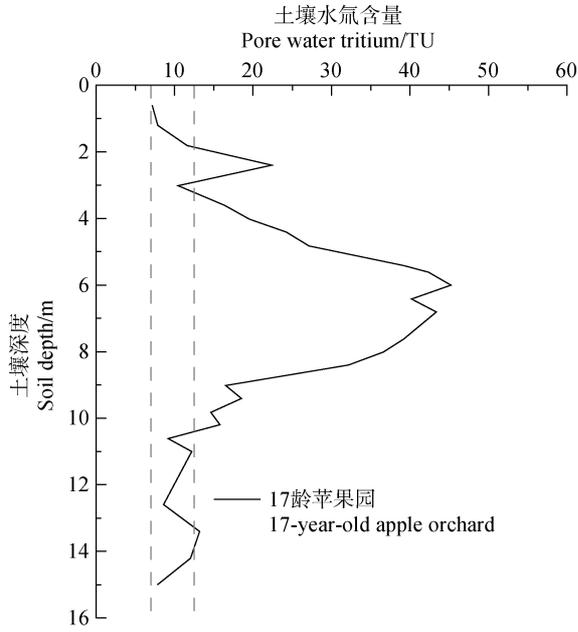


图2 陕西长武黄土塬区 17 龄苹果园土壤中放射性氚的剖面分布 (数据来自文献[20])

Fig. 2 The profile distribution of soil water radioactive tritium in a 17-year-old apple orchard at the Changwu tableland, Shaanxi (data from reference [20])

垂直分布,但同一土地利用类型各样点相似(图 3a~图 3b)。农地土壤水分在浅层(0~4 m)随土壤深度增加先减小后增大,在深层(4~10 m)相对稳定

并接近田间持水量(0.28 m³·m⁻³); 20 龄苹果园土壤水分在整个剖面随土壤深度增加几乎不变(除 S2 外),且远低于田间持水量。在浅层土壤中,农地和 20 龄苹果园土壤水分平均值分别介于 0.21~0.25 m³·m⁻³ 和 0.21~0.27 m³·m⁻³; 在深层土壤中,相应值分别介于 0.25~0.32 m³·m⁻³ 和 0.18~0.22 m³·m⁻³ (表 1)。t 检验结果表明,农地和 20 龄苹果园土壤水分在浅层土壤中无显著性差异(α=0.05, P=0.240),但在深层土壤中呈现极显著差异(α=0.01, P<0.01),20 龄苹果园深层土壤水分含量仅为农地的 71%。基于上述结果,可以认为浅根系农作物仅影响 0~4 m 层土壤水分,即农地土壤水分的消耗和补给主要发生在 4 m 以上,与前人研究一致^[21]; 与农地相比,20 龄苹果园对整个 0~10 m 层土壤水分均产生影响,甚至更深^[23]。

2.2 农地多年平均地表蒸散量

降水携带的氯离子随水分进入地表后,不随土壤蒸发返回大气,也不会随植物根系吸水过程被吸收,因此经历地表蒸散后的土壤水中的氯离子浓度会升高,反映了农地条件下降水入渗和蒸散的平衡状态。农地不同样地之间土壤水氯离子浓度在 0~6 m 差异较大(图 3c),这可能与样地的地理位置、管理水平和施肥方式及历史条件等有关,部分样地

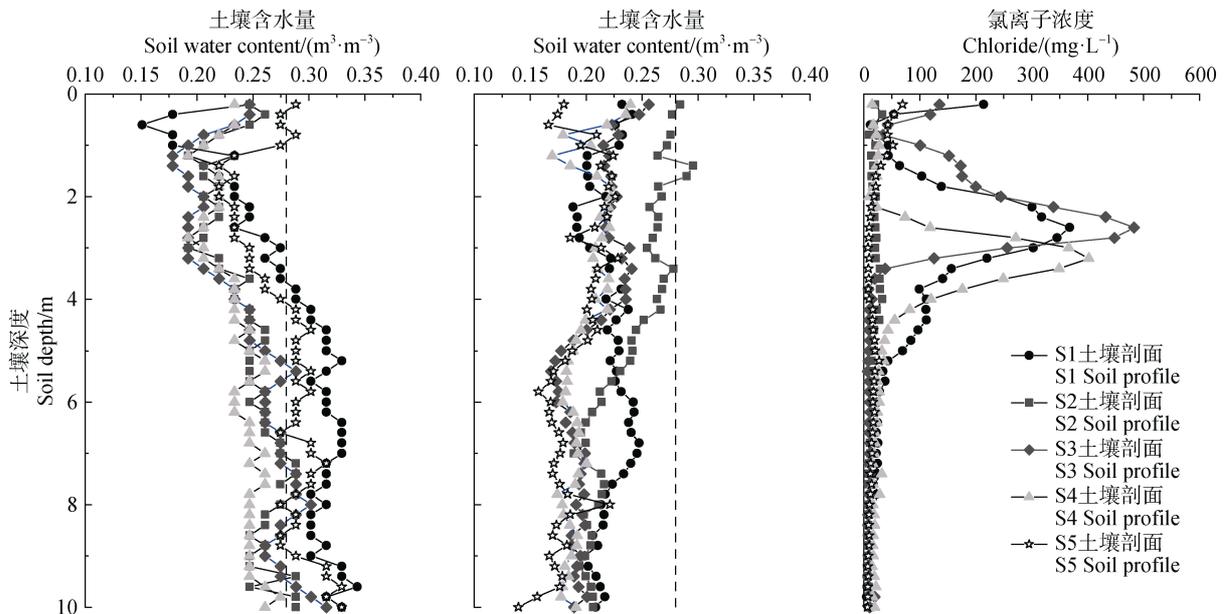


图3 农地(a)和 20 龄苹果园(b)土壤水分含量及农地土壤水氯离子浓度(c)的剖面分布

Fig. 3 The profile distributions of soil water content in farmlands(a) and 20-year-old apple orchards(b), and the profile distributions of chloride concentration of soil water in farmlands(c)

表 1 农地和 20 龄苹果园不同深度土层土壤水分含量

Table 1 Soil water content of different soil layers in farmlands and 20-year-old apple orchards/ ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$)

土层 Soil layer/ m	土地利用类型 Land use types	S1	S2	S3	S4	S5	平均值 Average	标准差 Standard deviation
0~4	农地	0.24	0.22	0.21	0.22	0.25	0.23	0.02
	20 龄苹果园	0.21	0.27	0.23	0.21	0.21	0.23	0.02
4~10	农地	0.32	0.26	0.27	0.25	0.30	0.28	0.02
	20 龄苹果园	0.22	0.21	0.19	0.19	0.18	0.20	0.02

(S1、S3 和 S4) 在 2~4 m 出现明显的氯离子峰面, 峰值浓度高达 $300\sim 500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 这是受到了施用工业化肥 (KCl) 的影响。各样地的农地土壤水氯离子浓度在 6~10 m 差异较小, 随深度变化基本保持稳定, 且浓度较低, 其值介于 $10.0\sim 19.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 $13.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。农地 6~10 m 土壤水较低的氯离子浓度、极小的空间差异以及不随土壤深度发生变化, 说明该深度内的土壤水氯离子不受工业化肥的影响。同时, 6 m 的稳定深度大于农作物根系影响深度 (4 m), 说明 6~10 m 土壤水氯离子处于稳态条件。此外, 由于研究区域地下水埋深达到 30 m 以上, 依靠土壤毛管作用无法对浅层土壤水分进行有效补给, 只存在农地对地下水的潜在补给,

因此水流是向下运动的。而图 3 中部分样点苹果园浅层土壤水分高于农地是由于农作物耗水高峰期要早于苹果, 8 月取样时农地浅层土壤水分已经经过较长时间消耗, 而苹果耗水高峰期才刚刚开始, 所以部分果园浅层土壤水分含量仍然较高。以上分析表明, 农地 6~10 m 土壤水氯离子满足氯离子质量平衡的假设条件, 可以用来计算农地条件下的多年平均潜在地下水补给量。

根据式 (4) 求得农地多年平均潜在地下水补给量 (表 2)。农地多年平均潜在地下水补给量为 $35\sim 70 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 平均值 \pm 标准差为 $(57 \pm 13.5) \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 占年均降水量的 10%。该结果与在陕西长武 ($58 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$)^[23]、陕西正宁 ($55\sim 71 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$)^[28] 和

表 2 农地和苹果园多年平均地表蒸散量

Table 2 The averaged long-term evapotranspiration of farmlands and apple orchards

土地利用类型 Land use types	项目 Items	S1	S2	S3	S4	S5	平均值 Average	标准差 Standard deviation
农地 Farmland	$\text{Cl}^- / (\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	14.8	10.0	10.1	19.7	11.4	13.2	3.7
	$R_F / (\text{mm}\cdot\text{a}^{-1})$	47	70	70	35	61	57	13.5
	$ET_F / (\text{mm}\cdot\text{a}^{-1})$	537	514	514	549	523	527	13.5
20 龄苹果园 20-year-old apple orchard	$ET_F/P / \%$	92	88	88	94	89	90	2.3
	$\Delta S_{F-A} / \text{mm}$	554	236	499	361	707	472	162
	$\Delta S_{F-A}/T / (\text{mm}\cdot\text{a}^{-1})$	28	12	25	18	35	24	8.1
22 龄苹果园* 22-year-old apple orchard*	$ET_A / (\text{mm}\cdot\text{a}^{-1})$	612	596	609	602	619	608	8.1
	$\Delta S_{F-A}/T / (\text{mm}\cdot\text{a}^{-1})$	-	-	-	-	-	41	9.5
	$ET_A / (\text{mm}\cdot\text{a}^{-1})$	-	-	-	-	-	625	9.5
	$ET_A/P / \%$	-	-	-	-	-	107	2

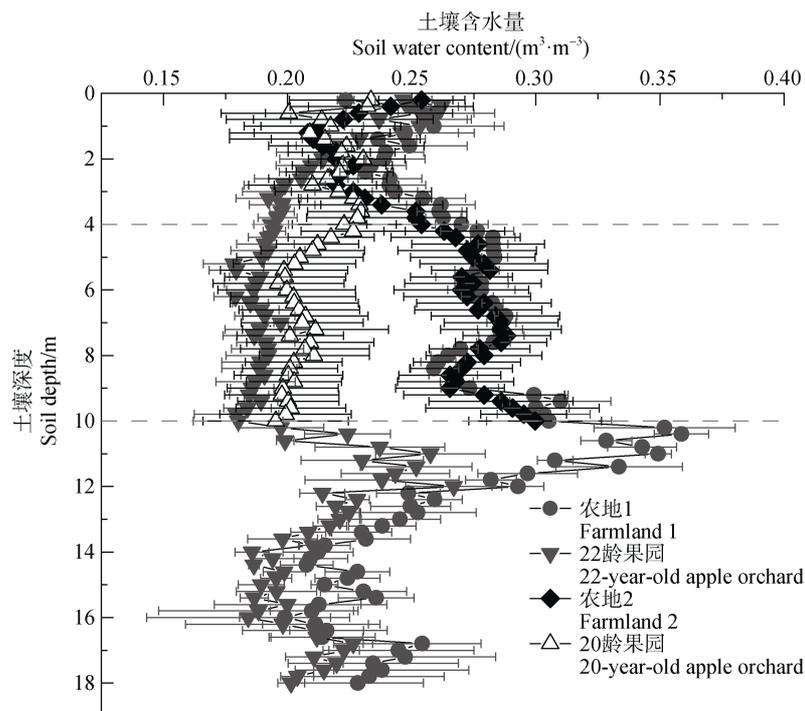
注: R_F , ΔS_{F-A} , T , ET_F , ET_A 和 P 分别为农地多年平均潜在地下水补给量, 农地与苹果园深层土壤储水量的差值, 苹果树种植年限, 农地地表蒸散量, 苹果园地表蒸散量和降雨量; 标识*的数据来源于文献[23]。Note: R_F , ΔS_{F-A} , T , ET_F , ET_A and P are respectively the long-term groundwater recharge in farmland, the difference of deep soil water storage between farmland and apple orchard, the stand age of apple orchard, evapotranspiration of farmland, evapotranspiration of apple orchard and precipitation; *, data from reference [23].

宁夏固原 ($55 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$)^[12] 相同土地利用类型下得出的结果一致, 说明本研究计算的农地多年平均潜在地下水补给量是可靠的。进一步, 根据式 (3) 计算出农地条件下多年平均地表蒸散量 (表 2)。发现农地多年平均地表蒸散量变化范围为 $514 \sim 549 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 平均值为 $(527 \pm 13.5) \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 约占年均降水量的 90%。研究区属于典型的旱区农业, 地表蒸散是农田生态系统水分消耗的主要途径, 通常会占降水的 90% 左右^[32]。有研究在甘肃定西利用涡度相关技术得出的实测结果表明, 冬小麦农田生态系统中地表蒸散量占降水量的 95.7%^[16], 本研究结果与之基本相同。

2.3 苹果园多年平均地表蒸散量

由前述可知, 20 龄苹果园 0~4 m 层土壤水分与农地无差异, 仅 4~10 m 土壤水显著低于农地。因此, 以农地为对照, 20 龄苹果园 4~10 m 层土壤水储量平均每年亏损 $12 \sim 35 \text{ mm}$, 平均值为 $(24 \pm 8) \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$; 22 龄苹果园 4~18 m 层土壤水储量平均每年亏损 $(41 \pm 9.5) \text{ mm}$ (表 2)。上述差异可能与采

取计算土壤水分亏缺量的土壤深度有关。20 龄苹果园在 10 m 深处的土壤水分与农地仍存在明显差异 (图 4), 说明苹果园在 10 m 以下范围的土壤水分仍然可能低于农地。例如, 22 龄苹果园土壤水分在 10~18 m 范围仍然较农地低。因此, 仅用 4~10 m 层土壤水分将低估总亏缺量, 低估了约 44%。进一步根据式 (5) 和式 (6) 求得苹果园的地表蒸散量 (表 2)。22 龄苹果园地表蒸散量平均值为 $(625 \pm 9.5) \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 约为年均降水量的 107%。显然, 22 龄苹果园地表蒸散量略大于年均降水量, 几乎无潜在地下水补给产生。Li 等^[29] 研究结果表明黄土高原区根系深度是决定潜在地下水补给的重要因子, 当根系深度超过 15 m 时潜在地下水补给量几乎为 0。在研究区 17 龄苹果树根系可达 15 m^[20], 故 20 龄以上的苹果园根系深度至少会超过 15 m, 据此可推测 20 龄苹果园无潜在地下水补给。此外, 20 龄苹果园 4~10 m 层亏缺的土壤水几乎全部用于苹果树蒸腾, 平均每年蒸腾量为 $(24 \pm 8) \text{ mm}$, 仅占地表蒸散的 4%, 即使是 4~18 m 层亏缺的土壤水也仅贡献了地表蒸散的 7%。



注: 农地 2 和 22 龄苹果园数据来自文献[23]。

Note: The data of farmland 2 and 22-year-old apple orchard come from the reference [23].

图 4 农地、20 龄苹果园和 22 龄苹果园土壤水分含量剖面分布

Fig. 4 The profile distribution of soil water content in farmlands, 20-year-old and 22-year-old apple orchards

3 讨论

农地和 22 龄苹果园平均地表蒸散量分别为 $527 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $625 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 其中, 22 龄苹果园较农地高 19%。地表蒸散作为地表水分平衡和能量平衡的重要组成部分, 不仅受生态系统过程中多种环境因子(太阳辐射、土壤含水量、空气相对湿度、气温等)的影响, 而且与生物因子(叶面积指数、气孔导度等)密切相关^[3]。尽管 5 个样点之间非生物环境因子可能存在一定差异, 但在两个对照土地利用采样点间距不超过 50 m, 加之长武塬区土壤均质化明显, 故非生物环境因子显然不是上述蒸散差异的主导因素, 可能更多反映了生物因子的作用, 即土地利用类型的影响。相较于农作物(小麦、玉米)而言, 苹果树有较大蒸腾需求, 从而导致实际蒸散量超过农地。诸多研究也表明了不同土地利用类型地表蒸散的差异。例如: 有研究利用彭曼公式和桑斯维特公式计算了山西吉县蔡家川流域的刺槐、油松和苹果的潜在蒸散量, 结果显示植被类型和种植年限均会显著影响蒸散^[33]。还有基于涡度相关技术的研究也发现吉林通榆半干旱区农田全年蒸散量较代表自然土壤覆盖状况的退化草地高 28.2 mm ^[34]。

农地年均蒸散量略低于年均降水量, 约占 90%, 而 22 龄苹果园年均蒸散量显著高于年均降水量, 约为 107%; 以农地为对照, 农地转化苹果园后, 20 年间总蒸散量增加了 $1\ 960 \text{ mm}$, 平均增加 $98 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 占年均降水量的 17%。表明农地转化为苹果园后地表蒸散有明显增加, 降水已经不能满足蒸散需求。之前也有基于水量平衡的研究得出了长武塬 7~9 龄苹果园生长季期间(4 月 15 日至 10 月 15 日)蒸散量约等于同期降水量, 但在干旱年份蒸散量高于降水量^[35]。此外在定西残垣沟壑区的研究也发现人工乔木油松和刺槐的蒸散量均远大于降水输入^[36]。

这些结果均表明黄土高原人工经济林草蒸散量大于降水量, 与本研究结果一致。自 20 世纪 90 年代以来, 无论是大面积种植苹果, 还一系列的退耕还林还草工程, 黄土高原土地利用变化的主要类型均为农地转变为高耗水的人工经济林草^[37], 这种转变方式势必会造成该地区地表蒸散总量的增加, 从而影响区域气候特征^[5]。在本研究中, 农地转变为苹果园 20 a 后, 不仅消耗了年内降水补给的浅层

土壤水, 并且还从 4~10 m 和 4~18 m 深层土壤水平均提取了 $24 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $41 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 占总蒸散量的 4%和 7%。上述结果表明: (1) 种植苹果树不仅消耗易于补给的浅层土壤水资源, 而且还消耗了难以补给和恢复的深层土壤水, 形成生态水文负效应; (2) 0~4 m 浅层土壤水以及截留的降水仍然是提供地表蒸散的主要来源, 可达 93%。部分植物水源划分的结果也表明浅层土壤水始终保持着较大贡献率^[22], 与本研究结果一致。综上所述, 黄土高原特殊的气候和深厚的土层为深根植物提供了得天独厚的条件, 人工经济林草(苜蓿、苹果树、枣树、刺槐和油松等)可以通过根系吸收深层土壤水以缓解巨大的蒸散需求和季节性干旱, 但是, 与年降水相比, 所占比例相对较小, 植被依然更多地依赖于吸收的浅层土壤水以及当年降水。因此, 采取合理的农艺和管理措施以减少蒸发、促进降水入渗、增加底墒等仍然是黄土塬区苹果园可持续发展的关键途径之一。

4 结论

陕西长武黄土塬区农地转变为苹果园后, 20 龄苹果园土壤水分在 4~10 m 显著低于农田, 仅为农田的 71%; 农地多年平均潜在地下水补给量为 $(57 \pm 13.5) \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 占年平均降水量的 10%, 相应的地表蒸散量为 $(527 \pm 13.5) \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 占年平均降水量的 90%; 农地转化为苹果园后地表蒸散量增加, 22 龄苹果园平均蒸散量为 $(625 \pm 9.5) \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 平均增加 $98 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 其中 4~10 m 和 10~18 m 深层土壤水分别贡献了 $(24 \pm 7.7) \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $(17 \pm 9.5) \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 约占总蒸散量的 4%和 3%。

参考文献 (References)

- [1] Good S P, Noone D, Bowen G. Hydrologic connectivity constrains partitioning of global terrestrial water fluxes[J]. *Science*, 2015, 349 (6244): 175—177.
- [2] Song X M, Zhang J Y, Zhan C S, et al. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(7): 779—790. [宋晓猛, 张建云, 占车生, 等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J]. *水利学报*, 2013, 44 (7): 779—790.]
- [3] Liu M L, Tian H Q, Chen G S, et al. Effects of land-use and land-cover change on evapotranspiration and water

- yield in China during 1900-2000[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2008, 44 (5): 1193—1207.
- [4] Zhang D J, Zhang X X, Wu P F. Relationship between ET and LUCC in a typical watershed of Loess Plateau over the past 20 years[J]. *Arid Land Geography*, 2011, 34(3): 400—408. [张殿君, 张学霞, 武鹏飞. 黄土高原典型流域土地利用变化对蒸散发影响研究[J]. 干旱区地理, 2011, 34 (3): 400—408.]
- [5] Gou J J, Wang F, Jin K, et al. Cooling effect induced by vegetation restoration on the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38 (11): 3970—3978. [苟娇娇, 王飞, 金凯, 等. 黄土高原植被恢复引发区域气温下降[J]. 生态学报, 2018, 38 (11): 3970—3978.]
- [6] Xue Y Y, Liang H B, Zhang Y, et al. Spatial and temporal variations of land surface temperature of the Loess Plateau[J]. *Earth and Environment*, 2017, 45 (5): 500—507. [薛亚永, 梁海斌, 张园, 等. 黄土高原地表温度变化的时空格局[J]. 地球与环境, 2017, 45 (5): 500—507.]
- [7] Li J J, Peng S Z, Li Z. Detecting and attributing vegetation changes on China's Loess Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 247: 260—270.
- [8] Shao M A, Jia X X, Wang Y Q, et al. A review of studies on dried soil layers in the Loess Plateau[J]. *Advances in Earth Science*, 2016, 31 (1): 14—22. [邵明安, 贾小旭, 王云强, 等. 黄土高原土壤干层研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2016, 31 (1): 14—22.]
- [9] Fu B J, Liu Y, Lü Y, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China[J]. *Ecological Complexity*, 2011, 8 (4): 284—293.
- [10] Liang W, Bai D, Wang F Y, et al. Quantifying the impacts of climate change and ecological restoration on streamflow changes based on a Budyko hydrological model in China's Loess Plateau[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51 (8): 6500—6519.
- [11] Gates J B, Scanlon B R, Mu X M, et al. Impacts of soil conservation on groundwater recharge in the semi-arid Loess Plateau, China[J]. *Hydrogeology Journal*, 2011, 19 (4): 865—875.
- [12] Huang T M, Pang Z H. Estimating groundwater recharge following land-use change using chloride mass balance of soil profiles: A case study at Guyuan and Xifeng in the Loess Plateau of China[J]. *Hydrogeology Journal*, 2011, 19 (1): 177—186.
- [13] Huang Y N, Chang Q R, Li Z. Land use change impacts on the amount and quality of recharge water in the loess tablelands of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 628/629: 443—452.
- [14] Zhang B, Zhang T F. Responses of reference crop evapotranspiration in Loess Plateau of Northwest China to climate change in 1961-2010 and estimation of future trend[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32 (3): 733—740. [张勃, 张调风. 1961—2010年黄土高原地区参考作物蒸散量对气候变化的响应及未来趋势预估[J]. 生态学杂志, 2013, 32 (3): 733—740.]
- [15] Feng X M, Fu B J, Piao S L, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1019—1022.
- [16] Yang F L, Zhang Q, Wang W Y, et al. Evapotranspiration and factors influencing evapotranspiration in the spring wheat farmland of China's Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34 (9): 2323—2328. [阳伏林, 张强, 王文玉, 等. 黄土高原春小麦农田蒸散及其影响因素[J]. 生态学报, 2014, 34 (9): 2323—2328.]
- [17] Han X Y, Liu W Z, Cheng L P. Vertical distribution characteristics and temporal stability of soil water in deep profile on the Loess Tableland, Northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28 (2): 430—438. [韩晓阳, 刘文兆, 程立平. 黄土塬区深剖面土壤水分垂直分布特征及其时间稳定性[J]. 应用生态学报, 2017, 28 (2): 430—438.]
- [18] Zhang S L, Yang D W, Yang Y T, et al. Excessive afforestation and soil drying on China's Loess Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2018, 123 (3): 923—935.
- [19] Fan J, Wang Q J, Jones S B, et al. Soil water depletion and recharge under different land cover in China's Loess Plateau[J]. *Ecology*, 2016, 9 (3): 396—406.
- [20] Zhang Z Q, Evaristo J, Li Z, et al. Tritium analysis shows apple trees may be transpiring water several decades old[J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31 (5): 1196—1201.
- [21] Liu K Y, Si B C, Zhang Z Q. Responses of water uptake pattern of apple trees with different stand ages to precipitation on the Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32 (4): 88—94, 108. [刘柯渝, 司炳成, 张志强. 黄土高原不同林龄苹果树根系吸水策略对降水的响应[J]. 水土保持学报, 2018, 32 (4): 88—94, 108.]
- [22] Zhao X N, Li N, Gao X D, et al. Characteristics of soil water utilization for different stand ages of jujube trees based on ^{18}O tracking[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34 (3): 135—142. [赵西宁, 李楠, 高晓东, 等. 基于 ^{18}O 示踪的不同树龄枣树土壤水分利用特征分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34 (3): 135—142.]
- [23] Zhang Z Q, Li M, Si B C, et al. Deep rooted apple trees decrease groundwater recharge in the highland region of the Loess Plateau, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 622/623: 584—593.

- [24] Wang R, Liu W Z, Zhao X P. Dynamic characteristics of groundwater level on Changwu tableland[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28 (3): 48—52. [王锐, 刘文兆, 赵小鹏. 长武塬区地下水动态特征分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28 (3): 48—52.]
- [25] Cheng L P, Liu W Z. Long term effects of farming system on soil water content and dry soil layer in deep loess profile of loess tableland in China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13 (6): 1382—1392.
- [26] Eriksson E, Khunakasem V. Chloride concentration in groundwater, recharge rate and rate of deposition of chloride in the Israel Coastal Plain[J]. *Journal of Hydrology*, 1969, 7 (2): 178—197.
- [27] Scanlon B R, Keese K E, Flint A L, et al. Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions[J]. *Hydrological Processes*, 2006, 20 (15): 3335—3370.
- [28] Huang T M, Pang Z H, Liu J L, et al. Groundwater recharge mechanism in an integrated tableland of the Loess Plateau, Northern China: Insights from environmental tracers[J]. *Hydrogeology Journal*, 2017, 25 (7): 2049—2065.
- [29] Li H, Si B C, Li M. Rooting depth controls potential groundwater recharge on hillslopes[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 564: 164—174.
- [30] Zhang L, Wang Y, Liu F L. Changes of tritium concentration in precipitation of China in two decades[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2008, 6 (6): 94—96. [张琳, 王莹, 刘福亮. 近二十年我国大气降水氚浓度及其变化[J]. *南水北调与水利科技*, 2008, 6 (6): 94—96.]
- [31] Cheng L P, Liu W Z, Li Z. Soil water in deep layers under different land use patterns on the Loess Tableland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34 (8): 1975—1983. [程立平, 刘文兆, 李志. 黄土塬区不同土地利用方式下深层土壤水分变化特征[J]. *生态学报*, 2014, 34 (8): 1975—1983.]
- [32] Zhang J, Wang L, Han X, et al. Evapotranspiration of farmland on loess tableland and its major influencing factors[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (6): 1421—1432. [张静, 王力, 韩雪, 等. 黄土塬区农田蒸散的变化特征及主控因素[J]. *土壤学报*, 2016, 53 (6): 1421—1432.]
- [33] Zhang X M, Yu X X, Wu S H, et al. Calculation and analysis of quota of water requirement of main afforestation species in Loess Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2008, 15 (1): 36—40. [张晓明, 余新晓, 武思宏, 等. 黄土高原主要造林树种需水定额计算与分析[J]. *水土保持研究*, 2008, 15 (1): 36—40.]
- [34] Zhao Q F, Guo W D, Ling X L, et al. Analysis of evapotranspiration and water budget for various land use in semi-arid areas of Tongyu, China[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2013, 18 (4): 415—426. [赵钱飞, 郭维栋, 凌肖露, 等. 半干旱区不同类型土地利用的蒸散量及水分收支差异分析——以通榆为例[J]. *气候与环境研究*, 2013, 18 (4): 415—426.]
- [35] Wang S Y, Wang L, Han X, et al. Evapotranspiration characteristics of apple orchard at peak period of fruiting in loess tableland[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2016, 52 (1): 128—135. [王石言, 王力, 韩雪, 等. 黄土塬区盛果期苹果园的蒸散特征[J]. *林业科学*, 2016, 52 (1): 128—135.]
- [36] Jian S Q, Zhao C Y, Fang S M, et al. Effects of different vegetation restoration on soil water storage and water balance in the Chinese Loess Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 206: 85—96.
- [37] Zhou S G, Shao Q Q, Cao W. Characteristics of land use and land cover change in the Loess Plateau over the past 20 years[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2016, 18 (2): 190—199. [周书贵, 邵全琴, 曹巍. 近20年黄土高原土地利用/覆被变化特征分析[J]. *地球信息科学学报*, 2016, 18 (2): 190—199.]

(责任编辑: 檀满枝)