

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.025.

张轩华, 黄亚楠, 李志. 陕北黄土区深剖面土壤水的多因子联合作用及主控因素[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 173-180, 187.

ZHANG Xuanhua, HUANG Yanan, LI Zhi. Multi-factor Combined Action and Main Controlling Factors of Soil Water in Deep Loess Profiles in Northern Shaanxi[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 173-180, 187.

陕北黄土区深剖面土壤水的多因子联合作用及主控因素

张轩华, 黄亚楠, 李志

(西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的]探究黄土高原植被变化后深剖面土壤水与各环境因子的关系,并识别主要控制因素,对土壤水的综合调控具有重要意义。[方法]在陕北定边县采集农地、草地、沙柳和杨树>15 m深土壤样品,利用传统统计学和小波相干分析等方法解析多个因子对土壤水含量的联合作用及主导性。[结果]0—15 m,土壤水含量和储量的大小顺序为农地>草地≈沙柳>杨树,水分亏缺量为810,1 375,1 371,1 762 mm。基于小波相干分析的控制因子识别,发现土壤电导率是解释水分运移的单一主导因子,其与土壤水的正相干区域贯穿整个尺度。农地产生联合作用的双因子组合是电导率—砂粒,沙柳和杨树是磁化率—砂粒,主要增加了大尺度的相干区域。[结论]深层土壤水受土壤性质的影响更大,但植物的根系情况会严重扰动水分与土壤性质间的关系。

关键词: 土壤水分; 植被变化; 土壤因子; 小波分析

中图分类号: S152.7⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)03-0173-08

Multi-factor Combined Action and Main Controlling Factors of Soil Water in Deep Loess Profiles in Northern Shaanxi

ZHANG Xuanhua, HUANG Yanan, LI Zhi

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] It is important to investigate the relationship between soil water and each environmental factor in the deep profile after vegetation change in the Loess Plateau and to identify the main controlling factors for the comprehensive regulation of soil water. [Methods] Soil samples were collected from farmland, grassland and the 15 m depth of the habitation of salix psammophila and Populus in Dingbian County, northern Shaanxi. The soil samples were analysed using traditional statistics and wavelet coherence analysis. [Results] The order of magnitude of soil water content and storage in 0—15 m was farmland>grassland≈salix psammophila>poplar, with water deficit of 810 mm, 1 375 mm, 1 371 mm and 1 762 mm, respectively. Based on wavelet coherence analysis of control factors, soil electrical conductivity (EC) was found to be the single dominant factor explaining water transport, and the area of positive correlation between EC and soil water was found throughout the scales. The two-factor combinations that combined effect of farmland are EC and sand, and magnetic susceptibility and sand for the lands grown salix psammophila and poplar. The two-factor combinations enhanced the degree of coherence mainly at large scales. [Conclusion] Deep soil water is more influenced by soil properties, but plant root conditions can seriously perturb the relationship between water and soil properties.

Keywords: soil moisture; vegetation change; soil factors; wavelet coherence

收稿日期: 2022-04-06

修回日期: 2022-05-13

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土区潜水补给的方式、速率与控制因素”(42071043)

第一作者: 张轩华(1996—), 男, 重庆潼南人, 硕士研究生, 研究方向为旱区水环境演变机制。E-mail: zhangxh@nwafu.edu.cn

通信作者: 李志(1978—), 男, 山东沂水人, 博士, 教授, 研究方向为旱区水循环与水环境演变机制与调控。E-mail: lizhibox@nwafu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

土壤水在土壤—植物—大气系统 (SPAC) 中控制着物质循环和能量转换^[1], 调节着旱区降水量和蒸发量变化^[2-3], 是植物生长的关键因素^[4], 特别是深层土壤水储量, 影响着生态系统的生产力和区域可持续发展^[5]。土壤水分受土壤性质、降雨入渗、地表蒸发、植物蒸腾和耕作管理等多种因子的影响。例如, 土壤孔隙度决定水的渗透性^[6], 土地覆盖变化影响陆地水循环和蒸发量^[7], 气候变化造成储水量减少和干旱程度增加^[8-9]。因此, 研究土壤水及其影响因子对旱区具有重要意义。

黄土高原生态环境脆弱, 水土流失严重, 退耕还林还草工程使其植被覆盖面积增加了 25%, 而森林变化在旱区会引发更大、更复杂的水文变异^[10]。特别是深根植物能够利用 10 m 以下土层的水分^[11], 且随恢复年限增加, 深层水分会出现不同程度的亏缺^[12-13], 极大限制该区植被的可持续性^[14]。相关学者已对土壤干层^[15]及土壤水的控制因素^[16]展开了一定研究, 但在影响因素分析方面目前多关注单一影响因素, 而针对多个因子联合作用的研究较少, 不利于土壤水的综合调控。

传统统计学方法难以分析土壤水文过程和物理性质的尺度依赖性^[17]。多元小波相干分析, 能够量化土壤水与多个因子在不同尺度的关系^[18], 已成功应用于气候变化对土壤水季节性影响^[19]、径流变化多因子联合效应

等^[20]研究。借助此方法, 可分析多个环境因子对土壤水的联合作用及其在不同尺度下的主导性。

本文以陕北黄土区为研究区, 通过分析定边县安边镇的农地、草地、沙柳、杨树 4 种不同土地利用方式下土壤水分特征, 利用传统统计学方法和小波相干分析探讨土壤水与多因子联合作用及主控因素, 以期为黄土高原土地资源和水资源合理利用提供依据。

1 研究区和研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省西北部的定边县安边镇 (36°49'—37°53' N, 107°15'—108°22' E), 毛乌素沙漠南岸风沙滩区和白于山丘陵沟壑区交界处 (图 1), 地势北低南高, 海拔 1 303~1 907 m。该区属温带半干旱大陆性季风气候, 气候干燥、风沙频繁, 水分蒸发量远大于降雨量。多年平均潜在蒸散发量为 1 071.2 mm, 降雨量为 317.3 mm, 降雨量年际变化大且集中在 7—9 月, 全年日照时数达到 2 743 h, 年平均气温 7.9℃。当地耕地面积 133 km², 以麻子、马铃薯、玉米、谷子等农作物为主。自退耕还林、还草以来, 林草地面积已达 80 km², 主要的植被为沙柳 (*Salix psammophila*)、杨树 (*Poplar*) 和樟子松 (*Pinus sylvestris*) 等。土壤类型为风沙土和沙壤土, 表土疏松, 保水性弱; 田间持水量 13%, 萎蔫湿度 3%^[21]。

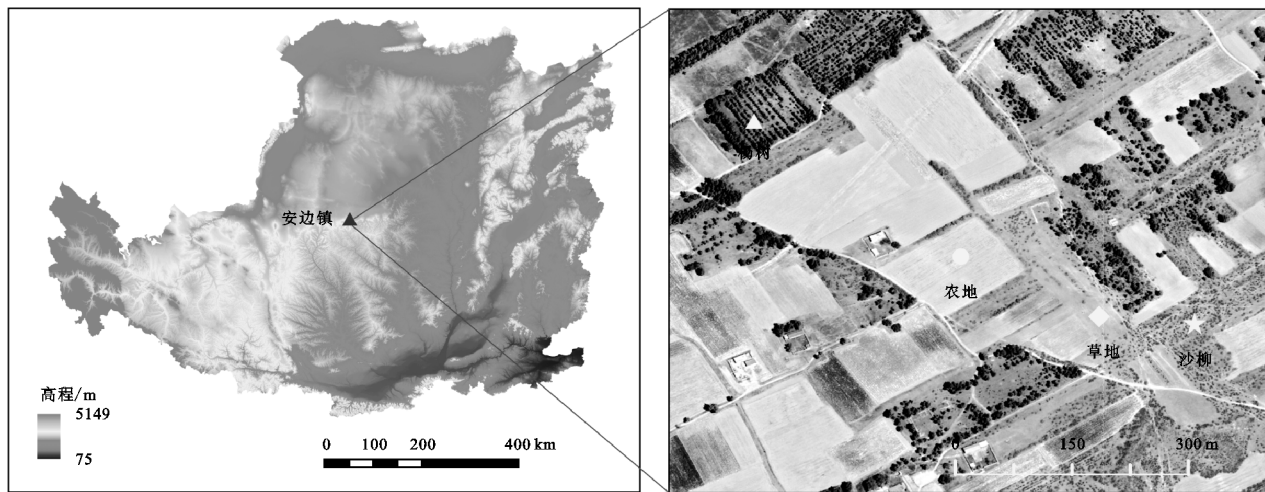


图 1 研究区地理位置和采样点分布

1.2 土壤样品采集与处理

2017 年 8 月在安边镇选取农地、草地、沙柳及杨树, 这是具有代表性的 4 种土地利用类型 (图 1)。样地地势平坦、无地表径流。草地、沙柳及杨树均由农地转变而来且无灌溉, 植被年限分别为 15, 45, 50 a, 因此, 土壤水分状况能够表征土地利用变化的影响。

打钻采集土壤样品。杨树地在 15 m 土层遇见钙质结核, 无法继续深入, 但水分状况已经稳定, 因此采样深

度为 15 m, 其余样地为 18 m, 每 20 cm 收集一个土样。烘干法测定土壤质量含水量。吸管法测定土壤颗粒组成, 根据 USDA 土壤质地分类标准, 黏粒粒径 0~0.002 mm, 粉粒粒径 0.002~0.05 mm 及砂粒粒径 0.05~2 mm。取 10 g 风干土样, 加入 50 ml 蒸馏水, 180 R 振荡 30 min, 静止 30 min, 使用 pH/电导率多参数测定仪 (SG78-FK-CN) 测定土壤 pH 和电导率 (EC)。土壤磁化率利用 Bartington 公司的 MS2 型仪器测定。

土壤有机碳使用重铬酸钾氧化法测定。

1.3 数据分析

为分析深剖面土壤水分特征,除实测的土壤水含量外,计算土壤储水量(SWS)和土壤水的亏缺量(WD):

$$SWS = SWC \times SBD \times h \quad (1)$$

$$WD = (W_F \times SBD \times h) - SWS \quad (2)$$

式中:SWS是土壤储水量(mm);SWC是土壤含水率(%);SBD是土壤容重(g/cm³);h是土层深度(cm);WD是土壤水亏缺量(mm);W_F是田间持水量(%)。

土壤容重根据黄土高原土壤容重变化传递函数^[22]计算:

$$\begin{aligned} SBD = & 1.8284 + 0.0429 \times \lg \text{Clay} + 0.0205 \times \\ & \text{Clay}^{0.5} - 0.0125 \times \cos \text{Clay} - 0.0061 \times \\ & \text{Silt} + 0.0001 \times \text{Silt} \times \text{SG} - 0.0098 \times \text{SG} - \\ & 0.0071 \times \text{SOC} - 0.0505 \times \text{SOC}^{0.5} + \\ & 0.0002 \times \text{SOC}^2 \end{aligned} \quad (3)$$

式中:Clay是黏粒(%);Silt是粉粒(%);SG是斜率(°);SOC是有机碳含量(g/kg)。

为研究土壤水的多因子联合作用,分析土壤性质的垂直变异特征,选择土壤质地、磁化率、pH和EC等指标。土壤质地与孔隙度有关并影响土壤水力特性^[23]。土壤磁化率携带古气候信息,与平均降雨量相关^[24],能表征深层土壤储存的信息。土壤水运动伴随着离子的吸附和迁移,离子运动导致的盐含量等会进一步影响土壤水特征,因此,选择pH和EC表征此方面^[25-26]。

采用变异系数(CV)、单因素方差分析等方法初步分析影响土壤水的因子,进一步利用皮尔逊相关分析和小波相干分析解析土壤水的多因子联合作用及主控因素。其中,双变量小波相干分析量化两组数据在不同尺度的相关程度:

$$R_n^2(s) = \frac{|S(s^{-1}W_n^{XY}(s))|^2}{S(s^{-1}|W_n^X(s)|^2) \cdot S(s^{-1}|W_n^Y(s)|^2)} \quad (4)$$

$$W_n^{XY}(s) = W_n^X(s)W_n^{Y*}(s) \quad (5)$$

式中:S是平滑算子;W_n^{XY}(s)是交叉小波谱;W_n^X(s)和W_n^Y(s)为X和Y序列的小波变换;W_n^{Y*}(s)是W_n^Y(s)的共轭复数。

X和Y数据序列之间的小波相位表示:

$$\varphi(s) = \tan^{-1}[\text{Im}(W_n^{XY}(s))/\text{Re}(W_n^{XY}(s))] \quad (6)$$

式中:Im和Re分别表示W_n^{XY}(s)的虚部和实部。

多变量小波相干以探究多种因子和土壤水的关系,在尺度为a,深度为b时:

$$\rho_m^2(a,b) = \frac{\vec{WY},X(a,b)\vec{WX},X(a,b)\vec{WY},X(a,b)^*}{\vec{WY},X(a,b)} \quad (7)$$

式中: $\vec{WY},X(a,b)$ 是平滑交叉小波功率谱; $\vec{WX},X(a,b)$ 多个预测变量X之间的平滑自和交叉小波功率矩阵; $\vec{WY},Y(a,b)$ 是响应变量X的平滑小波功率矩阵; $\vec{WY},X(a,b)^*$ 是 $\vec{WY},X(a,b)$ 共轭函数。

2 结果与分析

2.1 土壤水分总体特征

按照土壤水的垂直变异状况,可以将土壤水剖面分成4段(图2)。0—2 m,土壤水含量无一致规律;2—6 m,土壤含水量缓慢升高;6—12 m土壤水分变化最为强烈,农地、草地和沙柳地都呈现先增多后减少的趋势,杨树地则表现相反的趋势,9.4 m减小到最小值2.0%;>12 m剖面,各样地下土壤水含量趋于稳定,并趋于一致。0—15 m,土壤含水量农地>草地≈沙柳地>杨树地,分别为9.8%±4.1%,7.6%±3.6%,7.7%±3.8%和6.1%±1.9%。分段比较,0—6 m,平均含水量农地>杨树地>沙柳地>草地,分别为7.3%±2.4%,6.8%±2.0%,5.1%±2.4%和4.9%±1.6%;6—15 m,样地下土壤含水量的大小顺序与整个剖面相似。单因素方差分析表明,整个剖面0—15 m,农地显著大于其他样地,草地和沙柳地差异不显著,而杨树显著低于其他样地;0—6 m,农地和杨树差异不显著,草地和沙柳差异不显著,但前者显著大于后者。

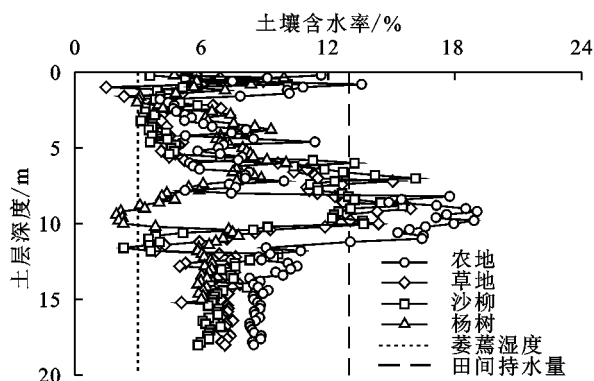
进一步计算土壤储水量和土壤水亏缺量(表1)。0—15 m土壤储水量农地>草地≈沙柳地>杨树地,分别为2 508,1 938,1 948,1 567 mm。分段比较,0—6 m农地、草地、沙柳地和杨树地分别是753,501,521,685 mm,占田间持水量的56%,38%,39%和52%。6—15 m储水量远高于0—6 m,农地、草地和沙柳地为1 427~1 754 mm,占田间持水量的72%~89%;杨树地的储水量为田间持水量44%。4个样地出现不同程度的土壤水分亏缺,整个剖面农地<草地≈沙柳地<杨树地,分别为810,1 375,1 371,1 762 mm。浅根植物的亏缺主要发生在0—6 m,而深根植物的亏缺主要发生在深层,如杨树6—15 m的亏缺量是0—6 m的1.8倍。

2.2 土壤因子垂直变异

草地和沙柳地土壤水分状况相似、样地相近,因此,仅分析农地、沙柳地和杨树地的土壤性质变异情况。整体而言,不同样地的土壤颗粒组成大致相似,黏粒含量少、粉粒和砂粒占有绝对优势,但垂直方向存在较大的波动,都为中等变异(表2),粉粒和砂粒的变异程度大于黏粒。0—12 m,粉粒和砂粒变化较

大,粉粒先增加后减少、砂粒则变化相反;其中,6—12 m 变化最为强烈,>12 m 颗粒组成基本一致(图3)。3种样地的土壤质地存在一定差异,沙柳地黏粒含量最少而粉粒最高,分别是 $11.9\% \pm 3.5\%$ 和 $48.2\% \pm 18.7\%$,黏粒与其他两地差异显著,主要体现在4—12

m 土层。农地和杨树地黏粒和粉粒平均含量较为接近,分别是 $15.6\% \pm 2.5\%$, $14.9\% \pm 3.9\%$ 和 $42.3\% \pm 14.3\%$, $41.2\% \pm 18.2\%$;杨树地砂粒含量最高,为 $43.9\% \pm 19.8\%$ 。但各样地中含量占比较大的粉粒和砂粒差异不显著。



注:小写字母表示显著性差异($p < 0.05$)。

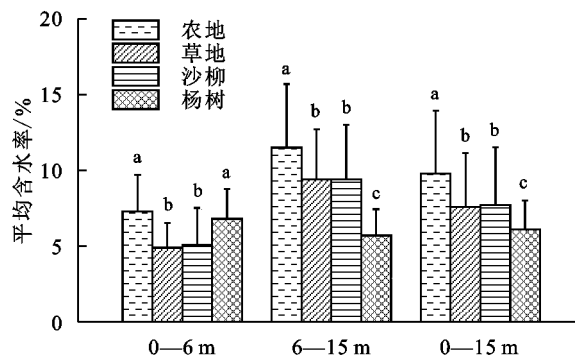


图2 土壤水分垂直分布特征

表1 不同土层土壤储水量和亏缺量

土地 利用	土壤储水量/mm			占田间持水量比例/%			土壤水亏缺量/mm		
	0—6 m	6—15 m	0—15 m	0—6 m	6—15 m	0—15 m	0—6 m	6—15 m	0—15 m
农地	753	1754	2508	56.4	88.5	75.6	582	228	810
草地	501	1437	1938	37.6	72.5	58.5	830	545	1375
沙柳	521	1427	1948	39.2	71.8	58.7	810	562	1371
杨树	685	882	1567	52.1	43.8	47.1	631	1130	1762

表2 土壤因子组成特征和变异情况

土地 利用	黏粒		粉粒		砂粒		磁化率		pH		EC	
	平均值/%	CV/%	平均值/%	CV/%	平均值/%	CV/%	平均值/ ($10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)	CV/%	平均值/%	CV/%	平均值/ ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	CV/%
农地	$15.6 \pm 2.9\text{a}$	18	$42.3 \pm 14.3\text{a}$	34	$42.1 \pm 14.5\text{a}$	34	$33.3 \pm 9.9\text{a}$	30	$8.8 \pm 0.2\text{b}$	2	$144.3 \pm 21.8\text{a}$	15
沙柳	$11.9 \pm 3.5\text{b}$	30	$48.2 \pm 18.7\text{a}$	39	$40.0 \pm 17.9\text{a}$	45	$33.8 \pm 8.1\text{a}$	24	$9.0 \pm 0.2\text{a}$	2	$137.2 \pm 20.1\text{a}$	15
杨树	$14.9 \pm 3.9\text{a}$	26	$41.2 \pm 18.2\text{a}$	44	$43.9 \pm 19.8\text{a}$	45	$36.5 \pm 11.9\text{a}$	33	$8.9 \pm 0.3\text{a}$	2	$144.9 \pm 22.2\text{a}$	15

注:小写字母表示显著性差异($p < 0.05$)。

土壤磁化率和电导率波动较大,分别介于 $(2.45 \sim 6.96) \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$, $108.0 \sim 189.7 \mu\text{S}/\text{cm}$,均为中等变异;土壤 pH 呈缓慢增加并逐渐稳定的趋势,介于 $8.3 \sim 9.7$,为弱变异。以上因子在 6—12 m 变化较大,>12 m 趋于稳定,与土壤水分和土壤质地的垂直分布相似。磁化率,农地和沙柳地接近,为 $(3.33 \pm 0.99) \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ 和 $(3.38 \pm 0.81) \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$;杨树地最高,为 $(3.65 \pm 1.19) \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。EC,沙柳地最低,为 $(137.2 \pm 20.1) \mu\text{S}/\text{cm}$;农地和杨树地接近,分别为 $(144.3 \pm 21.8) \mu\text{S}/\text{cm}$, $(144.9 \pm 22.2) \mu\text{S}/\text{cm}$ 。

3种样地均呈弱碱性,且 pH 平均值差别较小。土壤磁化率和 EC 虽然波动较大,但样地间差异不显著;pH,沙柳地与杨树地差异不显著,但它们与农地有显著差异。

2.3 土壤水的主导因子识别

相关性分析表明,土壤水含量与黏粒、粉粒、磁化率和 EC 显著正相关,与砂粒和 pH 负相关(表3)。不同土层土壤水含量与土壤性质的相关性差别明显,6 m 以下土壤水与各指标的相关程度高于 0—6 m。但土壤水与各因子间都存在相关性,无法识别主导因子,也表明因子间可能存在联合作用,因此,需要进一步的分析。

表4为土壤水与各因子的平均小波相干系数(WTC/MWC)和显著相干面积百分比(PASC)。单因子分析中,土壤水与各因子表现出显著的相干性, $WTC > 0.76$,3种样地解释土壤水运移的主导因子均为 EC,WTC 和 PASC 分别介于 $0.83 \sim 0.88$, $45\% \sim 65\%$;在>4 m 的尺度,EC 与土壤水的正相干区域贯穿整个尺度(图4)。多变量分析中,解释土壤水运移

的最佳双因子组合是 EC—砂粒、磁化率—砂粒、磁化率—砂粒, MWC 和 PASC 和分别为 0.83~0.88, 45%~65%; 双因子联合作用下, 沙柳和杨树地主要增强了大尺度的相干程度。增加到 3 个变量后, PASC 的增幅<5%, 不具有显著差异, 因此, 土壤水不受更多变量的联合作用。

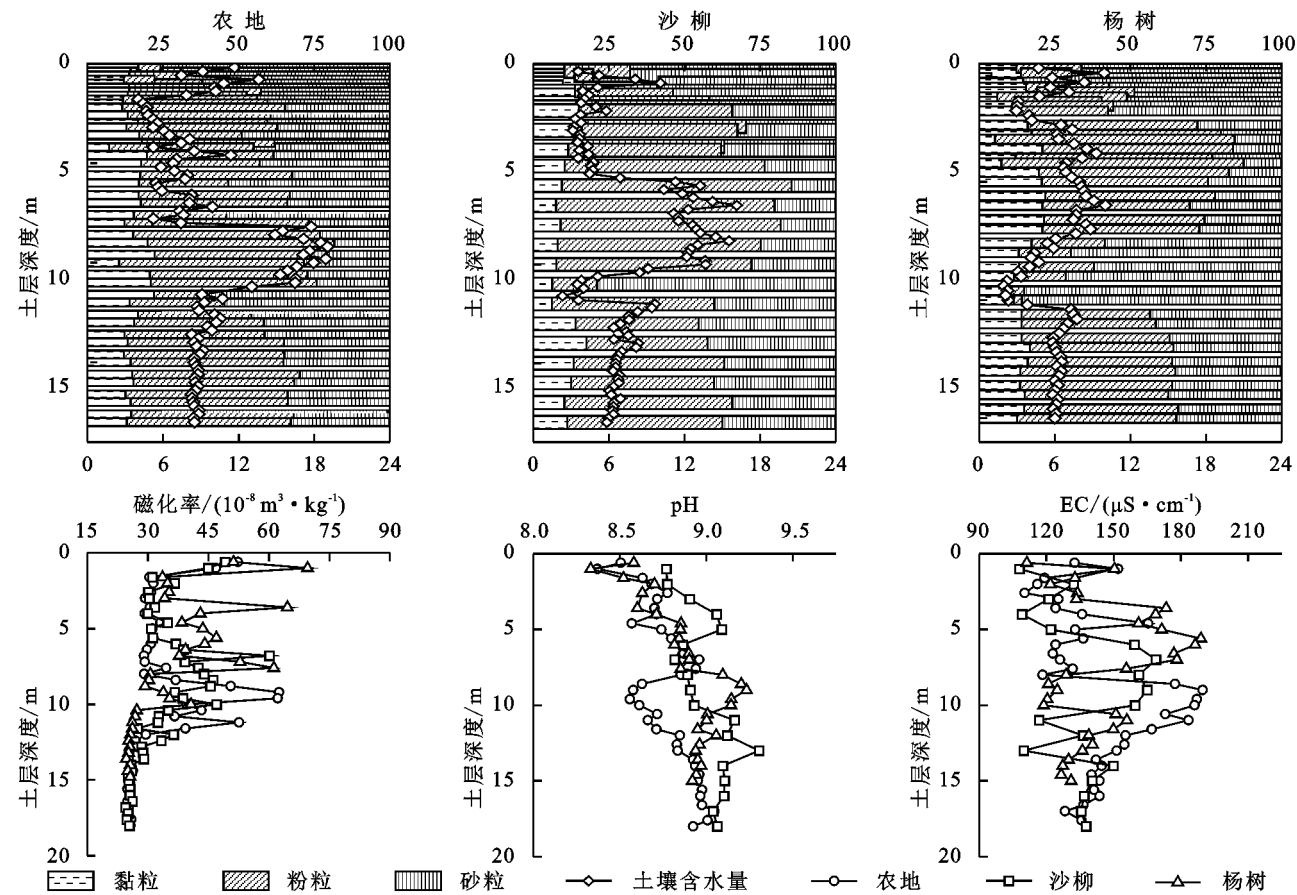


图 3 土壤因子垂直分布特征

表 3 不同土层土壤水与土壤因子的皮尔逊相关性

土地利用	深度/m	黏粒	粉粒	砂粒	磁化率	pH	EC
农地	0—6	0.194	−0.667 **	0.625 **	0.417	−0.689 *	0.913 **
	6—18	0.455 *	0.356	−0.519 **	0.816 **	−0.893 **	0.921 **
	0—18	0.370 *	0.125	−0.208	0.669 **	−0.418 **	0.933 **
沙柳	0—6	−0.207	0.248	−0.224	0.425	−0.222	0.863 *
	6—18	−0.358	0.842 **	−0.788 **	0.831 **	−0.820 **	0.859 **
	0—18	−0.470 *	0.585 **	−0.521 **	0.649 **	−0.356	0.882 **
杨树	0—6	0.508 *	0.249	−0.359	0.308	0.172	0.826 *
	6—15	0.733 **	0.882 **	−0.913 **	0.065	−0.765 **	0.785 **
	0—15	0.527 **	0.514 **	−0.589 **	0.208	−0.214	0.819 **

注: * 表示显著相关($p<0.05$), ** 表示极显著相关($p<0.01$)。

3 讨论

3.1 植被变化对土壤水的影响

SPAC 系统中,植物连接土壤和大气的水循环过程,控制着土壤水的垂直分布和时间稳定性^[27]。植被变化导致土壤水的补给量^[28]和蒸散发^[7]程度不同,造成土壤水的差异。本研究区干旱少雨、潜在蒸发量大,所有样地的土壤水分都存在亏缺,农地、草地、沙柳和杨树的水分亏缺量分别为 810,1 375,1 371,1 762 mm,亏缺程度远大于之前 5 m 以内土壤水分的相关研究^[29],说明土

壤水损失可以达到很深的土层。

土壤水平衡中,由于深层渗漏量较小^[30],对总体水储量差异的影响不大,因此,土壤水损失主要受蒸散发影响。蒸散发中,尽管农地和草地的蒸发作用大于灌木和林地,但由于蒸腾的比率远大于蒸发^[31],因此,根系吸水的差异可能有决定性影响。草地根系主要分布在 0—2 m 的土壤活跃层,也有研究显示多年生草地的根系能到达 5 m 土层^[32],所以草地对土壤水的利用大于农地。沙柳属于主根型植物,85% 的根系集中在 0—1 m 土层,但神木 17 a 树龄的沙柳垂直

根系能达到 2.7 m^[33]; 本研究中 45 a 树龄的沙柳, 根系很可能深入 3 m 以下土层吸收水分。高大乔木能利用 >10 m 的土壤水, 如米脂枣树根系达 10 m^[34], 延安 9 a 刺槐根系可到 14 m^[35], 长武 22 a 苹果树根

系深入 25 m^[36]; 因此, 50 a 树龄的杨树很可能吸收地下 10 m 甚至更深层的土壤水。该区地下水埋深较大, 降水是土壤水唯一补给来源, 深根植物造成深层水分亏缺后无法及时得到降雨补偿^[37]。

表 4 土壤水与土壤因子小波相干结果

小波相干	土壤因子	农地		沙柳		杨树	
		WTC/MWC	PASC/%	WTC/MWC	PASC/%	WTC/MWC	PASC/%
单因子	黏粒	0.82	19	0.76	2	0.77	5
	粉粒	0.85	27	0.83	24	0.81	24
	砂粒	0.86	31	0.84	25	0.81	25
	磁化率	0.87	38	0.81	29	0.86	7
	pH	0.83	36	0.84	29	0.84	11
	EC	0.88	65	0.86	46	0.83	45
	磁化率—黏粒	0.92	36	0.92	41	0.94	23
	磁化率—粉粒	0.93	47	0.96	66	0.92	55
	磁化率—砂粒	0.95	58	0.97	70	0.93	58
	磁化率—pH	0.92	24	0.94	43	0.95	8
双因子	EC—磁化率	0.96	54	0.95	57	0.94	45
	EC—黏粒	0.96	64	0.94	45	0.95	42
	EC—粉粒	0.96	79	0.93	49	0.94	51
	EC—砂粒	0.96	80	0.94	47	0.94	50
	EC—pH	0.95	51	0.92	30	0.94	49
	磁化率—黏粒—粉粒	0.98	47	0.98	74	0.96	56
三因子	磁化率—砂粒—黏粒	0.98	45	0.98	74	0.96	60
	磁化率—砂粒—粉粒	0.98	48	0.98	74	0.96	58
	EC—砂粒—磁化率	0.99	84	0.99	73	0.97	46
	EC—砂粒—黏粒	0.99	72	0.99	73	0.97	48
	EC—砂粒—粉粒	0.99	72	0.97	50	0.97	50
	EC—砂粒—pH	0.98	70	0.97	45	0.98	48

3.2 土壤水的多因子联合作用

EC 是解释水运移的单一主导因子, 与相关性分析的结果一致。EC 是表征可溶性盐分总含量的指标, 盐分运移主要受到水的影响。因此, 土壤水分和盐分常有强烈的相关性^[38], Turkeltaub 等^[39]甚至基于神木 4 种典型植被的测定结果建立了土壤水与 EC 的线性关系并进行相关预测。本研究中, >4 m 尺度, 土壤水与 EC 的强小波相干, 表明大尺度上 EC 与水分关系更加明显。

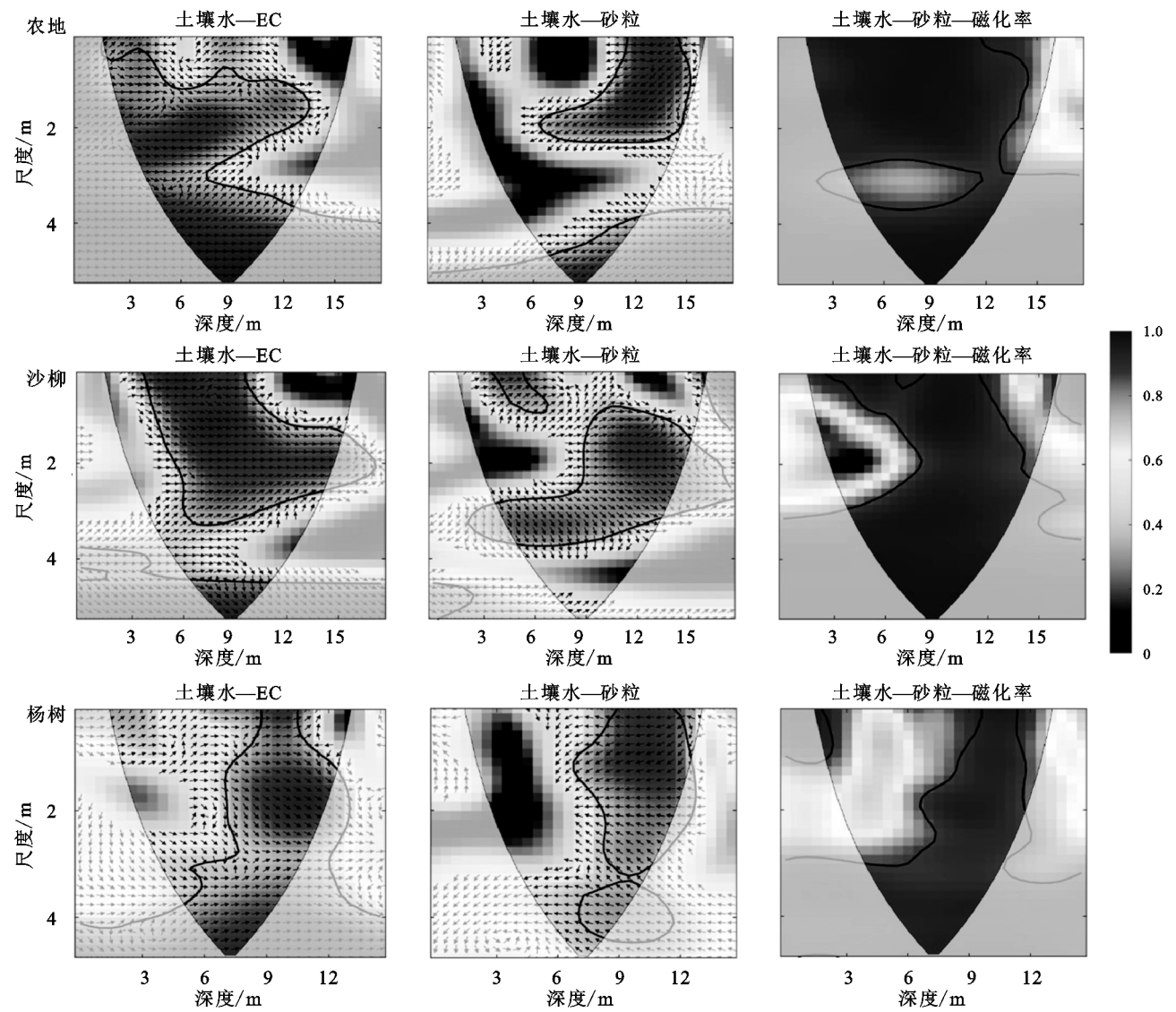
多因子联合作用中, EC、砂粒与磁化率是解释土壤水运移的关键因子。本研究区邻近毛乌素沙漠, 由于风力侵蚀、搬运等作用, 土壤砂粒含量 >40%, 是延安和长武的 2~4 倍, 表 4 中砂粒的 PASC 高于粉粒和黏粒, 表明砂粒对水分的贡献最大, 可能是因为砂粒含量高的土壤的渗透作用强。磁化率是土壤母质特性的表现, 黄土中粒径小的颗粒占比越多土壤磁性越高, 且与古气候的年均降水量和温度呈正相关^[24], 因此, 磁化率的作用可能说明深层土壤水与母质的关系, 且保留了过去的气候记录。因此, 识别出的关键因子可能解释了土壤和气候的作用。双因子联合作

用在不同尺度上增强的相干区域, 表明因子的联合作用在多尺度上解释土壤水分运移和变异特征具有协同作用。农地的主导复合因子是 EC—砂粒。沙柳地和杨树地没有改变单一主导因子, 但所有单因子 PASC 都降低, 且改变了因子间的联合作用。可见, 土壤因子的作用受到植被的重要干扰。

3.3 土壤水的主控因素

土壤性质是控制土壤水的内在因素^[1], 但植物的根系吸水是土壤水分损失的主要机制^[40], 二者的主导性可能随土层深度有差异^[13]。0—6 m 土壤水与各土壤因子的相关性低于深层(表 3), 说明深层水分受土壤性质的影响更大。本研究识别的关键土壤因子是土壤砂粒和磁化率, 可用于甄别土壤和植被对水分的主导性。农地和杨树地土壤质地和磁化率差异不显著, 且颗粒组成相似(表 2), 但后者土壤水含量远较前者小; 类似情况发生在农地和沙柳地的 0—6 m 土层, 农地砂粒含量(49.6%) 高于沙柳地(45.0%), 不利于水分保持, 但其土壤水含量高于沙柳地。上述结果都表明植物对土壤水的影响巨大, 严重扰动了土壤性质与土壤水间的关系。>6 m 土壤中, 沙柳地黏粒含量(10.0%) 低于农地(16.1%), 磁化

率相似,由于沙柳根系无法到达深层,沙柳地更大的深层水分亏缺可能主要是受土壤性质影响。可见,要考虑植被类型和土壤性质的主导性,甚至在不同层次的主导性,才能有效调控土壤水资源。



注:第 1 列为单一主导因子,第 2 列为双变量小波相干,第 3 列为最佳双因子组合。

图 4 土壤水与各因子小波相干图谱

4 结 论

本研究探讨了黄土高原植被变化下土壤水控制因子的联合作用与主导性。以农地、草地、沙柳地和杨树地为样点,发现土壤水含量和储量的大小顺序为农地>草地≈沙柳>杨树。基于小波相干分析的控制因子识别,发现土壤电导率是解释水分运移的单一主导因子,发生联合作用的双因子组合主要是电导率—砂粒和磁化率—砂粒。深层土壤水受土壤性质的影响更大,但植物的根系情况会严重扰动水分与土壤性质间的关系。因此,要协调黄土高原生态建设和水资源的可持续发展,需综合考虑植被类型和土壤性质的联合作用。

参考文献:

[1] Huang L, Shao M A. Advances and perspectives on soil

water research in China's Loess Plateau[J]. Earth-Science Reviews, 2019,199:102962.

[2] Goessling H F, Reick C H. What do moisture recycling estimates tell us? Exploring the extreme case of non-evaporating continents[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011,15(10):3217-3235.

[3] Zhou S, Williams A P, Lintner B R, et al. Soil moisture-atmosphere feedbacks mitigate declining water availability in drylands[J]. Nature Climate Change, 2021,11(1):38-44.

[4] Engelbrecht B M, Comita L S, Condit R, et al. Drought sensitivity shapes species distribution patterns in tropical forests[J]. Nature, 2007,447:80-82.

[5] Jia Y H, Shao M A. Dynamics of deep soil moisture in response to vegetational restoration on the Loess Plateau

- of China[J]. *Journal of Hydrology*, 2014,519:523-531.
- [6] Zhao S, Zhao Y, Wu J. Quantitative analysis of soil pores under natural vegetation successions on the Loess Plateau[J]. *Science China Earth Sciences*, 2010,53(4): 617-625.
- [7] Sterling S M, Ducharme A, Polcher J. The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle [J]. *Nature Climate Change*, 2013,3(4):385-390.
- [8] Pokhrel Y, Felfelani F, Satoh Y, et al. Global terrestrial water storage and drought severity under climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2021,11(3):226-233.
- [9] Berg A, Findell K, Lintner B, et al. Land-atmosphere feedbacks amplify aridity increase over land under global warming[J]. *Nature Climate Change*, 2016,6(9):869-874.
- [10] Zhang M, Wei X. Deforestation, forestation, and water supply[J]. *Science*, 2021,371:990-991.
- [11] Ali G, Wang Z, Li X, et al. Deep soil water deficit and recovery in alfalfa fields of the Loess Plateau of China [J]. *Field Crops Research*, 2021,260:107990.
- [12] Huang Z, Liu Y, Qiu K, et al. Soil-water deficit in deep soil layers results from the planted forest in a semi-arid sandy land; Implications for sustainable agroforestry water management [J]. *Agricultural Water Management*, 2021,254:106985.
- [13] Wang Y, Shao M A, Liu Z. Vertical distribution and influencing factors of soil water content within 21-m profile on the Chinese Loess Plateau[J]. *Geoderma*, 2013,193:300-310.
- [14] Li B B, Li P P, Zhang W T, et al. Deep soil moisture limits the sustainable vegetation restoration in arid and semi-arid Loess Plateau[J]. *Geoderma*, 2021,399:115122.
- [15] 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.
- [16] Qiao J, Zhu Y, Jia X, et al. Factors that influence the vertical distribution of soil water content in the critical zone on the loess plateau, China [J]. *Vadose Zone Journal*, 2018,17(1):1-7.
- [17] Lu Y, Si B, Li H, et al. Elucidating controls of the variability of deep soil bulk density [J]. *Geoderma*, 2019,348:146-157.
- [18] Biswas A, Si B C. Identifying scale specific controls of soil water storage in a hummocky landscape using wavelet coherency[J]. *Geoderma*, 2011,165(1):50-59.
- [19] Tang C, Piechota T C. Spatial and temporal soil moisture and drought variability in the Upper Colorado River Basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2009,379(1):122-135.
- [20] Yang W, Jin F, Si Y, et al. Runoff change controlled by combined effects of multiple environmental factors in a headwater catchment with cold and arid climate in northwest China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021,756:143995.
- [21] 姬王佳, 黄亚楠, 李冰冰, 等. 陕北黄土区深剖面不同土地利用方式下土壤水氢氧稳定同位素特征[J]. *应用生态学报*, 2019,30(12):4143-4149.
- [22] Wang Y, Shao M A, Liu Z, et al. Prediction of bulk density of soils in the Loess Plateau region of China [J]. *Surveys in Geophysics*, 2014,35(2):395-413.
- [23] Gao Z, Niu F, Lin Z, et al. Fractal and multifractal analysis of soil particle-size distribution and correlation with soil hydrological properties in active layer of Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Catena*, 2021,203:105373.
- [24] Jordanova D, Jordanova N. Updating the significance and paleoclimate implications of magnetic susceptibility of Holocene loessic soils[J]. *Geoderma*, 2021,391:114982.
- [25] Qiu Y, Fan Y, Chen Y, et al. Response of dry matter and water use efficiency of alfalfa to water and salinity stress in arid and semiarid regions of Northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2021,254:106934.
- [26] 魏孝荣, 邵明安. 黄土沟壑区小流域土壤 pH 值的空间分布及条件模拟[J]. *农业工程学报*, 2009,25(5):61-67.
- [27] Jia X, Shao M A, Wei X, et al. Hillslope scale temporal stability of soil water storage in diverse soil layers [J]. *Journal of Hydrology*, 2013,498:254-264.
- [28] Huang Y, Chang Q, 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*, 2018,628:443-452.
- [29] 杜康, 张北赢. 黄土丘陵区不同土地利用方式土壤水分变化特征[J]. *水土保持研究*, 2020,27(6):72-76.
- [30] Huang Y, Evaristo J, Li Z. Multiple tracers reveal different groundwater recharge mechanisms in deep loess deposits[J]. *Geoderma*, 2019,353:204-212.
- [31] Shi P, Huang Y, Ji W, et al. Impacts of deep-rooted fruit trees on recharge of deep soil water using stable and radioactive isotopes [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021,300:108325.
- [32] Gao X, Meng T, Zhao X. Variations of soil organic carbon following land use change on deep-loess hillslopes in China[J]. *Land Degradation & Development*, 2017,28(7):1902-1912.
- [33] 成向荣, 黄明斌, 邵明安. 神木水蚀风蚀交错带主要人工植物细根垂直分布研究[J]. *西北植物学报*, 2007,27(2):321-327.
- [34] 兰志龙, 潘小莲, 赵英, 等. 黄土丘陵区不同土地利用模式对深层土壤含水量的影响[J]. *应用生态学报*, 2017,28(3):847-855.

- 39(5):36-39.
- [11] 胡慧,包维楷,李芳兰,等.岷江上游4个栽培树种细根功能性状垂直分布的差异[J].生态学报,2020,39(1):46-56.
- [12] 《青海森林》编辑委员会.青海森林[M].北京:中国林业出版社,1993.
- [13] 惠刚盈,胡艳波.混交林树种空间隔离程度表达方式的研究[J].林业科学研究,2001,14(1):23-27.
- [14] 杨文娟.祁连山青海云杉林空间分布和结构特征及蒸散研究[D].北京:中国林业科学研究院,2018.
- [15] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [16] 王梅,张文辉.不同密度油松人工林生长更新状况及群落结构[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2009,37(7):75-80.
- [17] 洪梓明,邢亚娟,闫国永,等.长白山白桦山杨次生林细根形态特征和解剖结构对氮沉降的响应[J].生态学报,2020,40(2):608-620.
- [18] 黄林,王峰,周立江,等.不同森林类型根系分布于土壤性质的关系[J].生态学报,2012,32(19):6110-6119.
- [19] 安慧,韦兰英,刘勇,等.黄土丘陵区油松人工林和白桦天然林细根垂直分布及其与土壤养分的关系[J].植物营养与肥料学报,2007,13(4):611-619.
- [20] 尤健健,张文辉,邓磊,等.间伐对黄龙山油松中龄林细根空间分布和形态特征的影响[J].生态学报,2017,37(9):3065-3073.
- [21] Vennetier M, Zanetti C, Meriaux P, et al. Tree root architecture: new insights from a comprehensive study on dikes[J]. Plant & Soil, 2015, 387(1/2): 81-101.
- [22] 魏孝荣,邵明安.黄土高原沟壑区小流域坡地土壤养分分布特征[J].生态学报,2007,27(2):603-612.
- [23] 郭灵辉,王道杰,张云红,等.蒋家沟新银合欢人工林土壤养分分布及其与细根的关系[J].中国水土保持,2010(12):46-49.
- [24] 邸楠,席本野, Jeremiah R. PINTO, 等.宽窄行栽植下三倍体毛白杨根系生物量分布及其对土壤养分因子的响应[J].植物生态学报,2013,37(10):961-971.
- [25] 燕辉,苏印泉,李吉平,等.秦岭北坡刺槐人工林细根垂直分布及其与土壤养分的关系[J].水土保持研究,2008,15(3):65-73.
- [26] Pregitzer K S, King J S, Burton A J, et al. Responses of tree fine roots to temperature[J]. The New Phytologist, 2000, 147(1): 105-115.
- [27] 张雷,项文化,田大伦,等.第2代杉木林土壤有机碳、全氮对细根分布及形态特征的影响[J].中南林业科技大学学报,2009,29(3):11-15.

(上接第172页)

- [9] 马扶林,李全平,高贵生.2018年青海湖东北岸气象因素影响下的草地土壤水分及植被特征响应[J].草原与农业,2019,31(3):32-37.
- [10] 颜送宝,王丽云,邹璐,等.青藏高原草地不同利用方式下土壤碳氮与土壤性状的关系[J].生态科学,2019,38(2):105-111.
- [11] 石培宏,杨太保,田庆春,等.靖远黄土—古土壤色度变化特征分析及古气候意义[J].兰州大学学报:自然科学版,2012,48(2):15-23.
- [12] 陈杰,杨太保,曾彪,等.中国帕米尔地区黄土上部色度变化特征及古气候意义[J].沉积学报,2018,36(2):333-342.
- [13] 卢演涛,刘高魁,彭文世.黄土中(微斜长石)/(石英)、(方解石)/(石英)及其古环境的意义[J].地球化学,1982,11(2):198-204.

(上接第180页)

- [35] Wang Y, Hu W, Zhu Y, et al. Vertical distribution and temporal stability of soil water in 21-m profiles under different land uses on the Loess Plateau in China [J]. Journal of Hydrology, 2015, 527: 543-554.
- [36] Li H, Si B, Ma X, et al. Deep soil water extraction by apple sequesters organic carbon via root biomass rather than altering soil organic carbon content[J]. Science of the Total Environment, 2019, 670: 662-671.
- [37] Ji W, Huang Y, Shi P, et al. Recharge mechanism of deep soil water and the response to land use change in the loess deposits [J]. Journal of Hydrology, 2021, 592: 125817.
- [38] 冯挺,黄法融,郝建盛,等.巩乃斯河谷地带地表土壤水分和电导率的分布特征[J].干旱区研究,2020,37(6):1457-1468.
- [39] Turkeltaub T, Wang J, Cheng Q, et al. Soil moisture and electrical conductivity relationships under typical Loess Plateau land covers[J]. Vadose Zone Journal, 2022, 21(1): e20174.
- [40] Wang Y, Shao M A, Zhu Y, et al. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(4): 437-448.