

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.02.029

韩晓阳, 王亚萍, 朱元骏, 等. 黄土塬区果园—农田交界带土壤水分分布及农田对果园的供水特征[J]. 水土保持学报, 2024, 38(2):197-204.

HAN Xiaoyang, WANG Yaping, ZHU Yuanjun, et al. Soil water distribution and water supply characteristics of farmland to apple orchard in their adjacent areas on the Loess Tableland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2):197-204.

黄土塬区果园—农田交界带土壤水分分布及农田对果园的供水特征

韩晓阳¹, 王亚萍^{1,2}, 朱元骏¹, 刘文兆¹

(1.西北农林科技大学水土保持科学与工程学院(水土保持研究所), 陕西 杨凌 712100;

2.安康学院旅游与资源环境学院, 陕西 安康 725000)

摘要: [目的] 为探明黄土高原南部塬区果园—农田镶嵌格局下土壤水分空间分布与协同利用特征。

[方法] 选取长武塬区 10 龄、21 龄和 25 龄苹果园(AO10、AO21 和 AO25)及其邻近农田, 通过测定 2021 年雨季后果园—农田交界带有关位点的土壤含水量, 定量计算农田土壤储水对果园耗水的贡献。[结果] 2021 年降水量 756 mm, 为典型的丰水年份, 农田和 AO21、AO25 果园降雨入渗深度在 11 月底分别达 8.4、7.0、5.0 m。AO10 果园—农田交界带以 4 m 深度为界, 其下部土壤含水量较上部大, 4—10 m 土层平均含水量为 25.5%; AO21 果园 0—7 m 土层平均含水量为 22.1%, 7—10 m 为 15.0%; AO25 果园 0—5 m 土层平均含水量为 20.9%, 5—10 m 土层平均含水量为 13.6%, AO21 和 AO25 果园分别在 7.0、5.0 m 以下仍存在土壤干层。水平方向上, AO21、AO25 果园利用邻近农田土壤水分的距离分别达到 5、8 m, 农果交界面上农田向果园的供水量, 当以干层上界划分土壤剖面, 其上为表观供水量, 2 个果园分别为 0.08、0.25 m³/m²; 其下为实际供水量, 分别为 0.45、0.81 m³/m²。[结论] 黄土塬区果园和农田镶嵌布局是一种较为合理的利用结构, 在其规划管理中应考虑果树年限及其相邻农田宽度等因素, 研究结果有助于推进区域土壤水资源的可持续利用及其空间优化。

关键词: 土壤含水量; 果园—农田交界带; 植被格局; 土壤干层; 黄土高原

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)02-0197-08

Soil Water Distribution and Water Supply Characteristics of Farmland to Apple Orchard in Their Adjacent Areas on the Loess Tableland

HAN Xiaoyang¹, WANG Yaping^{1,2}, ZHU Yuanjun¹, LIU Wenzhao¹

(1. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering (Institute of Soil and Water Conservation), Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. School of Tourism, Resources and Environment, Ankang University, Ankang, Shaanxi 725000, China)

Abstract: [Objective] To investigate the spatial distribution and cooperative utilization characteristics of soil water under the orchard-farmland mosaic pattern in the southern Loess Tableland. [Methods] The 10-year-old, 21-year-old, and 25-year-old apple orchards (AO10, AO21, and AO25) and their adjacent farmland were selected in Changwu tableland were selected to quantitatively calculate the contribution of soil water storage to water consumption of orchard. By measuring the soil water content at relevant sites in the orchard-farmland interface zone after the rainy season in 2021. [Results] The precipitation in 2021 is 756 mm, which was a typical wet year. The rainfall infiltration depth of farmland and AO21, AO25 orchards reached 8.4, 7.0, and 5.0 m at the end of November, respectively. AO10 orchard-farmland boundary zone is 4 m deep, the soil water content in the lower part is larger than that in the upper part, and the average soil water content was 25.5% in the 4—10 m soil layer. In AO21 orchard, the average soil water content of the 0—7 m soil layer was 22.1%, and that of the 7—10 m soil layer was 15.0%. the average soil water content of the 0—5 m

收稿日期: 2023-09-03

修回日期: 2023-10-27

录用日期: 2023-11-30

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-03-04

资助项目: 国家自然科学基金项目(42007011, 41971049); 中国科学院西部青年学者项目(XAB2018B08)

第一作者: 韩晓阳(1987—), 男, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事植被格局与土壤水碳关系研究。E-mail: xyhan11@nwfau.edu.cn

通信作者: 刘文兆(1960—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事流域水文生态学研究。E-mail: wzliu@ms.iswc.ac.cn

soil layer of AO25 orchard was 20.9%, and that of 5—10 m was 13.6%. The soil dry layer of AO21 and AO25 orchard was below 7.0 and 5.0 m, respectively. In the horizontal direction, the distance of soil water used by AO21 and AO25 orchards from adjacent farmland reached 5 and 8 m, respectively, and the water supply from fields to orchards at the agro-fruit interface was 0.08 and 0.25 m³/m² when the soil profile was divided by the upper boundary of the dry layer. Below is the actual water supply, which is 0.45 and 0.81 m³/m², respectively. [Conclusion] The mosaic layout of apple orchards and farmland in the Loess tableland region is a reasonable utilization structure, and factors such as the age of apple trees and the width of adjacent farmland should be considered in land planning and management. The research results will contribute to promote the sustainable utilization and spatial optimization of regional soil water resources.

Keywords: soil water content; orchard-farmland interface zone; vegetation pattern; dry soil layer; the Loess Plateau

Received: 2023-09-03

Revised: 2023-10-27

Accepted: 2023-11-30

Online(www.cnki.net): 2024-03-04

植被格局演变背景下的水—土相互作用及其生态效应是地理学可持续性研究的关键科学问题之一^[1]。不同植被格局下由于土壤性状、根系分布、地表覆盖的差异,土壤水分分布及其运动过程也呈现不同,相邻景观单元之间存在土壤水分运动和交换过程^[2]。明确植被配置格局和土壤水分利用过程之间的耦合关系,对农林复合系统土壤水分可持续利用与管理具有重要意义。

农林复合系统是指在同一土地管理单元上配置多年生木本和农作物等其他栽培植物,以实现生态、经济多重收益的人工复合生态系统^[3]。农林复合系统可充分利用不同植物根系深度对水土资源的利用差异,形成一种较为合理的植被配置格局,促进降水的多层拦蓄和土壤水分的高效利用^[4-5],在资源有限的农业生态系统中起到提高产量、提高水分利用效率和减缓土壤退化等作用^[4]。目前有关农林复合系统土壤水分交换和水文联系研究主要集中在农田—防护林过渡带^[6]、退耕林草地交界带^[7]及农作物与枣树^[8]等。有研究^[9]表明,在核桃树行间种植小麦,其根系可以深入到作物根系无法利用的土层深度,以缓解植物间在浅层的土壤水分竞争。在极端干旱期,农林复合系统增强种间协同作用、稳定产量,在一定程度上可有效缓解水资源短缺问题^[10]。尺度放大条件下,果园—农田镶嵌分布模式也可看成一种农林复合系统。目前把果园—农田作为一个整体^[11],对其土壤水分的分布、消耗与协同利用过程的综合研究还不多见。

黄土高原南部塬区是我国北方重要的旱作农业区,在维护区域粮食安全和农业经济发展中起着重要作用。近 30 年来,该区农业产业结构已经由单一的粮食生产发展为粮食和苹果并重的生产模式,部分区域苹果面积已占到耕地面积的 60%^[12]。土壤水是农林复合系统中不同植物竞争的直接水源。然而,由于

果树和农作物根系分布的差异,二者对土壤水分的利用策略有所不同:果树往往因需水量大于降水量而持续调用深层土壤水分,进而形成难以恢复的土壤干层^[13-15];粮食作物通常仅利用浅层土壤水分就可满足其生长需求,根系周围形成的暂时性土壤干层可在雨季后消除^[16]。考虑到果树与农作物根系对土壤水分利用的差异,在果园和邻近农田的交界处,果树可能会吸收农田土壤水分以满足其高耗水生长,农田水分则可以得到循环补给,从而可以保证果园—农田交界带土壤水分的可持续性,以达到协同利用的目的。既要推进经济发展,又要保障粮食安全,对于以雨养农业为主的黄土塬区,明确农田与果园镶嵌分布下各自用水差别及其之间的水文联系在学术研究与实践应用上都具有重要意义。

因此,本研究选取 10, 21, 25 龄果园及其邻近农田组成的样地为研究对象,利用野外调查、测定和室内分析相结合的方法,分析果园—农田交界带土壤水分的空间分布特征,量化农田—一侧土壤水分对果园的贡献,以为优化区域果园—农田复合模式与适度生产力管理、实现土壤水分的可持续利用提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黄土高原南部的陕西省长武县,附近有陕西长武农田生态系统国家野外科学观测研究站(35°14'N, 107°40'E),海拔 1 200 m。该区属暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温 9.1 °C,年平均降水量为 584 mm,其中 7—9 月的降水约占全年降水的 55%;年平均潜在蒸散量为 949.3 mm^[17]。主要土壤类型为黑垆土,土壤有机质含量约为 6.7 g/kg, 0—1 m 土层内容重变化明显,平均 1.34 g/cm³, 1—2, 2—10 m 土层平容重分别为 1.28, 1.30 g/cm³^[18], 田间持水量平均值为(21.16±0.86)%(g/g)^[18], 塬面

潜水位 50~80 m^[19]。耕地主要利用类型包括农田和苹果园,主要粮食作物为冬小麦和春玉米。2022 年长武县苹果园面积达到 1.67 万 hm²,总产量 32 万 t^[20]。

1.2 样品采集与分析

土壤样品采集于 2021 年 11 月 27 日至 12 月 1 日,期间无降水。在塬面上选取树龄分别为 10, 21, 25 龄(记为 AO10、AO21 和 AO25)的 3 个苹果园及其相邻农田,果树品种为富士 (*Malus pumila* Mill.), 基本信息见表 1。所选样地均位于平坦塬面,其中果园在栽植苹果树之前全部为农田,而相邻农田为连作小麦地,之前并未栽植果树;样地均由当地农民常规管理、无灌溉,果园中人工堆砌的垄埂阻断地表径流的形成。

表 1 果园基本信息

Table 1 Basic information of the selected apple orchards

样地名称	树龄/a	株高/m	胸径/cm	株×行距/m	产量/(kg·hm ⁻²)
AO10	10	2.7±0.2	10.6±1.2	3×4	15 000
AO21	21	2.9±0.3	20.0±0.6	3×4	45 000
AO25	25	3.2±0.2	22.8±0.8	3×4	39 000

由图 1 可知,选取果园(AO)、果园—农田交界(BL)、2 农田 1(C1)~农田 5(C5)等采样点,其中 AO 和 BL、BL 和 C1 之间水平距离为 2 m,C1~C5 间隔分别为 1.5 m。在上述采样点采集 0—10 m 剖面土壤样品,深度间隔为 20 cm。采集的土壤样品分为 2 份:一份用铝盒收集,采用烘干法(105 °C 烘干至恒重)测定土壤质量含水量(% ,g/g);另一份用塑封袋收集,经室内风干、研磨后过 2 mm 筛,用 Mastersizer-2000 激光粒度分析仪(Malvern Instruments,

Melvin, England)来测定其颗粒组成,粒径划分依据美国农业部标准(USDA particle size classification criteria),即黏粒直径<0.002 mm,粉粒直径 0.002~0.05 mm,砂粒直径 0.05~0.2 mm。

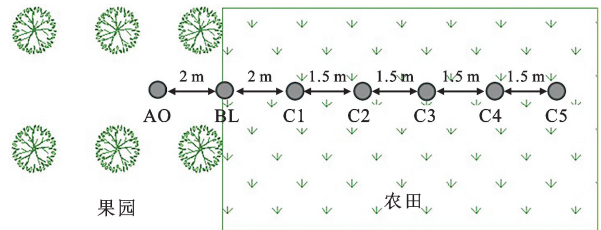


图 1 样点位置示意

Fig. 1 Layout of the sampling sites

本研究采样点均位于塬面 1 km² 内,各样点 0—10 m 剖面土壤颗粒组成分布基本一致(图 2),不同样点土壤湿度剖面的差别主要由植物根系吸水的差异所致。本文以农田剖面为对照,比较不同树龄果园土壤水分差异,分析其特征。另外,在农田降雨入渗深度判定上,选用 2021 年雨季前后长武站土壤深剖面观测数据,当年作物为冬小麦,土壤含水量采用中子仪测定。

1.3 相对水分亏缺量计算

根据前期研究结果^[11,21],10 龄果园的耗水情况与农田相似,其对邻近农田土壤水分无显著影响。因此选取距 10 龄果园 3.5 m 处的农田 C2 位点为对照(CK),其他位点的土壤含水量(SWC_i)与对照值之差占对照值的百分数,即称为相对水分亏缺量(相对亏水量,SWC_{rd},公式 1)。

$$SWC_{rd} = \frac{SWC_i - SWC_{ck}}{SWC_{ck}} \times 100\% \quad (1)$$

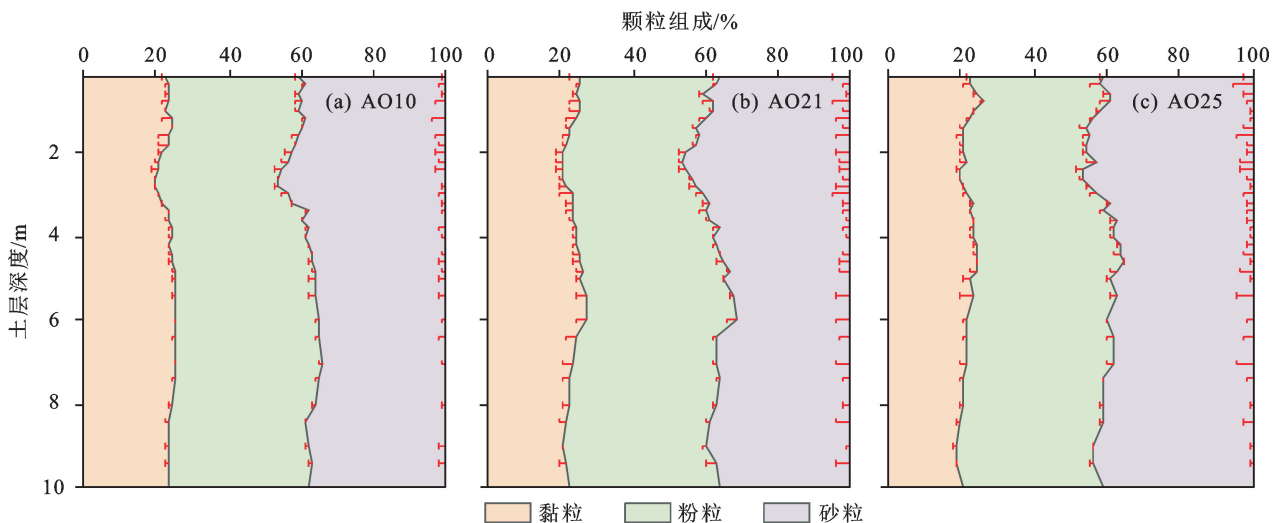


图 2 不同年限果园及其邻近农田土壤颗粒组成垂直分布

Fig. 2 Vertical distribution of soil particle composition in the sampling sites within different aged apple orchards and their adjacent farmland

1.4 农田向邻近果园侧向供给水量计算

分析果园—农田交界带农田一侧受果树吸水影响的土体的水分状况,取与交界线平行方向的宽度为单位距离时(m),测定深度范围内单位深度农田向果园侧向供给的总水量用 SW 表示(m^3/m^2 ,或 m),由公式(2)计算:

$$SW = \frac{1}{2D} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^u [(\rho_{i,j} \Delta \theta_{i,j} + \rho_{i-1,j} \Delta \theta_{i-1,j}) \times (h_{i,j} - h_{i-1,j}) \times (d_{i,j} - d_{i,j-1})] \quad (2)$$

式中: ρ 为土壤容重(g/cm^3 ,或 t/m^3),采用环刀法测定,全剖面统一取 $1.3 \text{ g}/\text{cm}^3$ [19]; θ 为土壤质量含水量(g/g ,或 t/t); $\Delta \theta$ 为对照农田土壤含水量与测定位点土壤含水量之差(t/t); i 为受果树吸水影响的水平方向测定位点序号,当 $i=0$ 时为农果交界线位置; h 为测定位点距交界线的水平距离(m); n 为总位点数;土钻法取土时以 0.2 m 为深度间隔; j 为测定的土层序号; $d_{i,j}$ 为位点序号为 i 时第 j 层的下界深度(m); u 为总的土层数; D 为测定的总深度(m)。在降水入渗补给深度(或土壤干层的上界深度)之上,由于降水入渗补给的影响,用公式(2)计算的供水量小于实际的供

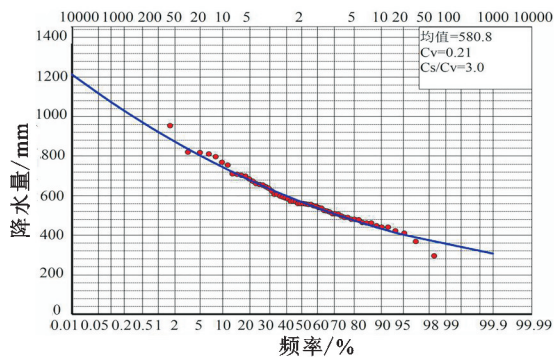


图 3 1962—2021 年降水量频率分布及 2021 年各月降水和气温

Fig. 3 Frequency distribution of precipitation from 1962 to 2021 and the monthly precipitation and temperature in 2021

丰水年份降雨入渗可有效缓解其他年份果树根系吸水与降水补给负平衡所形成的土壤干层。一定年份降雨入渗深度与降水年型、土壤干层的位置及干化程度相关。对农田雨季前后 0—10 m 剖面土壤含水量进行了对比,2021 年 11 月底农田降雨入渗深度可达 8.4 m。

前期研究[11,21]结果表明,15 龄以上果园在 4.0 m 以下根系深度范围内,土壤呈现干燥化,土壤湿度多等于或小于 15%,随着树龄的增加,土层干燥化增强,土壤湿度进一步下降。AO21 和 AO25 果园分别在 7.0,5.0 m 才出现土壤干层(图 4),其测定时间是在当年雨季之后的 11 月底,表明 2021 年 2 个果园降雨入渗深度已分别达到 7.0,5.0 m,这个结果大于一般年份的入渗深度值。

水量,称为“表观供水量”;在入渗补给深度之下,计算值即为实际供水量。

1.5 数据处理

本文气象资料来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),采用 Microsoft Excel 2013 软件对试验数据进行整理和计算,利用 SPSS 22.0 软件进行统计分析,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)研究不同采样点土壤含水量和亏缺量的差异,并采用 Duncan 法进行多重比较,显著性水平分别为 $p < 0.01$ 和 $p < 0.05$;利用皮尔逊 III 型曲线进行年降水量的频率分析;使用 Sigmaplot 12.5 和 Origin 9.0 作图。

2 结果与分析

2.1 2021 年雨季后农田和果园降雨入渗补给深度

2021 年长武降水量为 756.0 mm,较多年(1962—2021 年)平均值(580.8 mm)提高 30.2%,仅 7—10 月降水量为 553.2 mm,占全年降水量的 73.2%,显著高于多年同期平均值(图 3)。

从 1962—2021 年降水量频率分布曲线上看,2021 年降水量 756.0 mm 频率为 8.6%,为重现期 11.6 年的丰水年(图 3)。

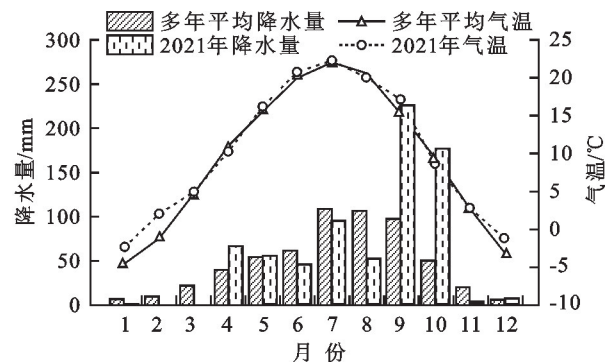


图 4 2021 年雨季后农田果园降雨入渗深度

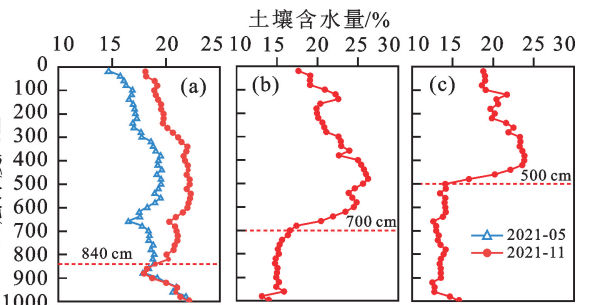


图 4 2021 年雨季后农田果园降雨入渗深度

Fig. 4 Depth of rainfall infiltration in farmland and apple orchards after the rainy season in 2021

2.2 不同树龄果园—农田交界带土壤水分剖面分布特征

随着树龄的增加,不同果园—农田交界带距交界线相同距离的位点 0—10 m 土壤含水量大致呈减小趋势,AO10、AO21 和 AO25 果园及其农田交界带土

壤含水量变化范围分别为 23.6%~23.9%,20.0%~21.7%和 17.2%~19.4%(表 2),其中 AO10 果园平均含水量为 23.9%,显著高于 AO21(20.0%)和

AO25(17.2%)($p < 0.05$)。垂直方向上进一步分层分析,上述土壤含水量的差异主要出现在 3—10 m 土层,各位点 0—3 m 土层含水量差异并不显著。

表 2 果园—农田交界带土壤含水量

Table 2 Soil water content across the boundary zones between the apple orchard and cropland									%
土层深度/m	样地名称	果园 AO	交界带 BL	农田 1C1	农田 2C2	农田 3C3	农田 4C4	农田 5C5	
0—3	AO10	21.0 ± 0.9Aa	20.7 ± 1.0Aa	20.7 ± 1.5Aa	20.8 ± 0.9Aa				
	AO21	20.4 ± 1.4Aa	20.5 ± 1.1Aa	20.1 ± 1.7Aa	20.7 ± 1.1Aa	20.2 ± 1.3Aa			
	AO25	20.4 ± 1.5Aa	20.7 ± 1.1Aa	20.8 ± 1.2Aa	20.4 ± 1.2Aa	20.5 ± 1.5Aa	20.1 ± 1.6a	20.1 ± 1.6a	
3—10	AO10	25.1 ± 1.2Aa	24.7 ± 0.9Aa	25.2 ± 1.1Aa	24.8 ± 0.8Aa				
	AO21	19.9 ± 4.7Bb	21.5 ± 4.0Bab	20.7 ± 3.0Bb	21.3 ± 1.8Bab	22.3 ± 1.9Aa			
	AO25	16.1 ± 4.1Cc	17.3 ± 3.2Cb	16.6 ± 1.8Cbc	17.5 ± 1.8Cb	18.7 ± 1.8Bab	18.5 ± 1.1ab	19.2 ± 1.9a	
0—10	AO10	23.9 ± 2.3Aa	23.6 ± 2.1Aa	23.9 ± 2.5Aa	23.7 ± 2.0Aa				
	AO21	20.0 ± 4.0Bb	21.2 ± 3.4Bab	20.5 ± 2.7Bab	21.1 ± 1.7Bab	21.7 ± 2.0Aa			
	AO25	17.2 ± 4.1Cc	18.2 ± 3.2Cbc	17.8 ± 2.6Cb	18.3 ± 2.1Cabc	19.2 ± 1.9Bab	19.0 ± 1.5ab	19.4 ± 1.9a	

注:表中数据为平均值±标准差;不同大写字母表示不同树龄果园—农田交界带相同位点间的差异($p < 0.05$);不同小写字母表示同一树龄的交界带内不同位点之间的差异($p < 0.05$)。

分析不同树龄果园—农田交界带 0—10 m 土壤含水量等值线图(图 5),在垂直方向上,AO10 果园及其邻近农田大致以 3.5 m 深度为界,其上土壤含水量在 21.0%左右,其下土壤含水量较大,在 25.0%左右;AO21 和 AO25 果园的剖面含水量分布与 AO10

相比有较大差别,其中 AO21 果园 0—7,7—10 m 土层平均含水量分别为 22.1%和 15.0%,AO25 果园 0—5,5—10 m 土层平均土壤含水量分别为 20.9%和 13.6%,二者降雨入渗深度以下含水量均显著低于对照农田土壤含水量($p < 0.01$)。

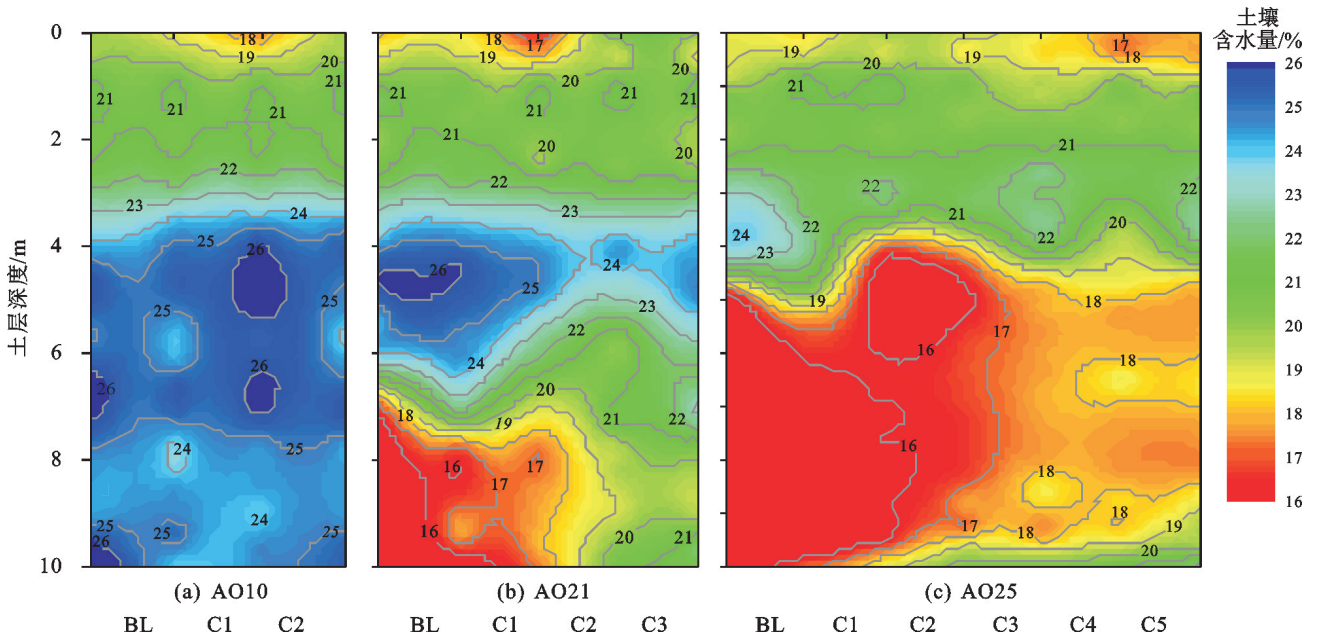


图 5 果园—农田交界带土壤含水量分布等值线图

Fig. 5 Profile distributions of soil water content across the boundary zone between the apple orchard and farmland

在水平方向上,AO21、AO25 果园—农田交界带随着距交界线距离的增加,土壤含水量呈增大趋势(表 2、图 5),但 AO10 果园—农田各位点土壤含水量均呈较高水平,无趋势性差异。AO21、BL、C1、C2 和 C3 位点平均土壤含水量分别为 20.0%,21.2%,20.5%,21.1%和 21.7%,AO25 果园至 C5 位点土壤含水量从 17.2%逐渐增加到 19.4%,呈显著增大趋势($p < 0.05$),但 C5 位点土壤含水量仍显著低于对照

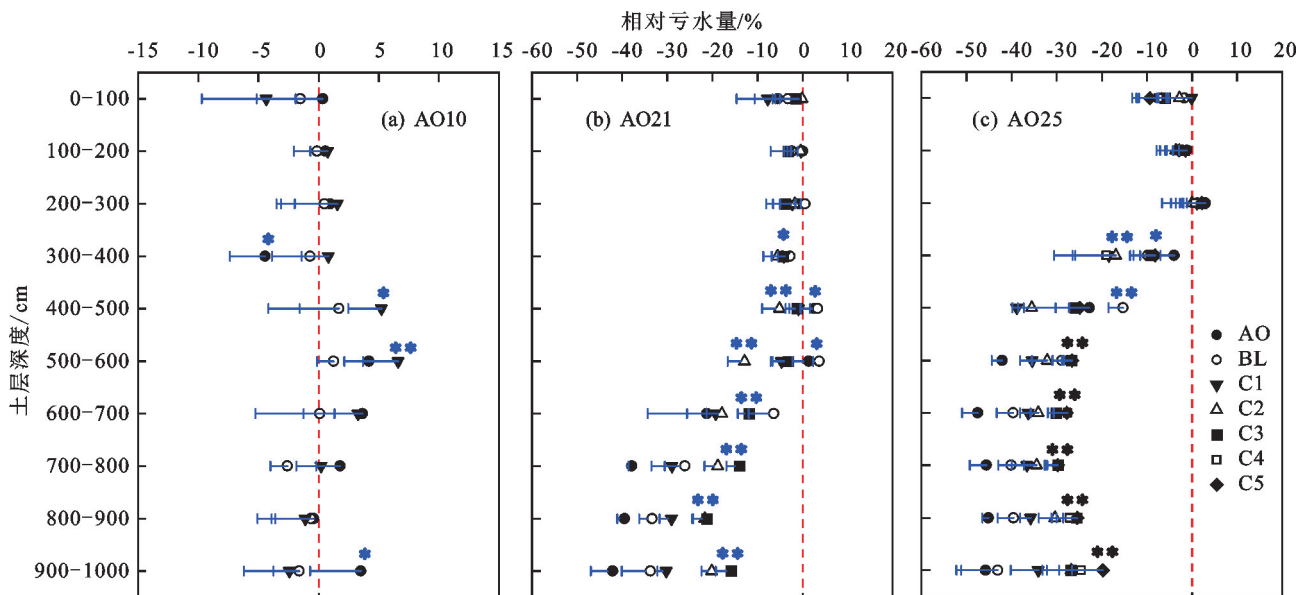
农田(表 2、图 5),表明 AO25 果园在水平方向上影响邻近农田土壤水分的距离已超过 8 m。

2.3 不同树龄果园—农田交界带土壤含水量的比较及其对果园的贡献

与对照农田相比,不同树龄果园及其邻近农田土壤相对亏水量呈现明显差异(图 6)。AO10 及 BL、C1 位点相对亏水量均在 -5%~5%,无趋势性剖面差异(图 6a)。AO21 各位点 0—6 m 土层含水量大体

小于对照农田,但差别不大,6—10 m 土层含水量与对照农田逐渐拉开距离,相对亏水量均值为 -35.2% ~ -15.8% (图 6b)。

AO25 各位点 0—4 m 土层深度含水量小于对照农田但差别不大,4—10 m 土层相对亏水量为 -47.5% ~ -22.8% (图 6c)。



注: * 和 ** 分别表示不同位点相对亏水量间的显著性差异水平分别为 $p < 0.05$ 和 $p < 0.01$ 。

图 6 果园及其邻近农田位点相对水分亏缺量

Fig. 6 Relative deficiency of soil water content at sites between the apple orchard and cropland

为了量化果园—农田交界带中农田土壤水分对果园耗水的贡献,对 0—10 m 土层范围内农田向果园侧向供给的总水量进行测算(表 3)。

结合前面分析,AO10 果园—农田交界带各位点间土壤含水量差异不显著。AO21 果园邻近农田 5

m 宽度范围内表现供水量和实际供水量分别为 $0.08, 0.45 \text{ m}^3/\text{m}^2$,AO25 果园邻近农田 8 m 宽度范围内向果园的表现供水量和实际供水量分别为 $0.25, 0.81 \text{ m}^3/\text{m}^2$,不同位点供水量的变化趋势与土壤含水量一致(表 3)。

表 3 邻近农田向果园侧向供给水量

Table 3 Water supply characteristics of farmland to apple orchard in their adjacent areas

样地名称	土层深度/m	供水量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2})$					总量
		农田 1C1	农田 2C2	农田 3C3	农田 4C4	农田 5C5	
AO21	0—7	0.02	0.04	0.02			0.08
	7—10	0.20	0.16	0.09			0.45
	0—10	0.07	0.07	0.04			0.19
AO25	0—5	0.05	0.06	0.05	0.04	0.05	0.25
	5—10	0.24	0.16	0.14	0.13	0.13	0.81
	0—10	0.15	0.11	0.10	0.09	0.09	0.53

3 讨论

3.1 土壤水分对果园—农田镶嵌分布格局的响应

植被格局变化通过驱动一系列植物生理、生态过程与土壤水文过程,并结合气候和地形等因素综合控制土壤水分的空间变异^[22-23]。随着空间尺度的扩大,植被结构、土壤类型、降水量、蒸发力等的差异成为影响土壤水分时空分布的重要因素^[24]。本研究中,果园—农田镶嵌分布形成的植被格局,对土壤水分分布产生显著影响:交界带上农田一侧距离交界线愈近,受果园的影响愈大,土壤含水量愈小(表 2,图 5)。这种林木对相邻农田土壤水分的吸收在澳大利亚的西

部^[25]和我国黑河流域^[26]也有发现,这均表明深根系植物生长对相邻农田的土壤水分产生影响。尽管有研究^[27]表明,苹果树有 54.2% 的根系集中在 0—120 cm 土层,其中 60—100 cm 是主要的水分来源土层,但本项研究及相关研究表明,黄土高原大规模的农田转变为苹果园过程中,深层土壤水分消耗严重^[28],导致深层土壤干燥化^[29-30],甚至影响地下水补给^[31]。土壤干层的出现与该区降水量密切相关:当年降水量不足以满足苹果树的水分需求,根系调用深层土壤水分而形成暂时性和稳定性土壤干层^[32]。本文 AO21 和 AO25 果园土壤干层分别出现在 7,5 m 深度(图

5),该深度较王亚萍^[21]之前测得的值有所增大,这是由 2021 年丰水年 756.0 mm 降水量入渗所致。因此,探讨土壤水分对植被分布格局的响应,需结合降水、气温等条件,采取合理的措施对其进行调控,才能有助于优化复合模式,实现土壤水分的可持续利用。

3.2 黄土塬区土壤水分协调利用与土地利用结构管理

苹果树作为深根系、高耗水量植物,除了利用深层土壤储水之外,也可以吸收邻近农田下的土壤水分^[11],这种可以利用多种水源的根系吸水模式被称为双元根系^[27]。本研究中 AO21 和 AO25 果园在 10 m 深度仍存在土壤干层,且邻近农田深层也有土壤干层出现(图 5),水平方向上影响农田的距离超过 8 m,这与王亚萍^[21]前期研究结果(7 m)比较,影响范围更大。YI 等^[33]对黑河中游农田—防护林—荒漠过渡带的土壤水分运动观测和模拟则发现,防护林通过延伸至农田的根系截取农田水分,农田灌溉可以补给距农林边界 15 m 远的林地土壤水分。上述影响距离受树木种类、林龄以及灌溉等条件的影响而呈现差异,但均证实深根系植物对邻近农田土壤储水的利用。与深根系果树相比,小麦等农作物则主要利用 0—2 m 土层的土壤储水^[34],其根层土壤水分亏缺形成的土壤干层在雨季后一般会得到补给^[16]。基于水量平衡过程,本研究对邻近农田土壤储水对果园耗水的贡献进行量化,并计算出 0—10 m 深度范围内农田向 AO21 和 AO25 果园侧向供给的总水量分别为 0.19,0.53 m³/m²,其中入渗深度以下土层的实际供水量分别为 0.45,0.81 m³/m²,表明深根系果树对邻近农田储水的利用还受树龄影响。因此,在农业产业布局中,农果镶嵌结构下农田宽度不宜小于 15~20 m,需要保持合理的果园、农田面积比例,实现区域土壤水资源的优化利用、协调粮食安全与经济发展。

4 结论

(1)2021 年黄土塬区苹果园降雨入渗深度较一般年份有所增大,其深度值也随树龄增大而减小,21,25 龄果园入渗深度在 11 月底分别达到 7,5 m,其下仍存在土壤干层。

(2)果园—农田交界带不同位点 0—10 m 土壤含水量也随树龄增大呈减小趋势,其显著差异主要出现在 3—10 m 土层。

(3)基于水量平衡方程,对邻近农田土壤储水对果园耗水的贡献进行量化,并确定不同树龄果园影响邻近农田土壤水分的宽度范围,认为对于以雨养农业为主的黄土塬区而言,深层土壤水分和邻近农田土壤储水都是苹果树生长的重要水分来源。

因此,为了保证有限降水资源的高效、可持续利

用,推动该地区粮果复合生态系统的协同发展,果园和农田镶嵌布局是一种较为合理的利用结构,且在实际规划中应充分考虑果树年限、与果园相邻的农田宽度等因素。

参考文献:

- [1] FU B J. Promoting geography for sustainability[J]. *Geography and Sustainability*, 2020, 1(1): 1-7.
- [2] 李小雁. 干旱地区土壤—植被—水文耦合、响应与适应机制[J]. *中国科学:地球科学* 2011, 41(12): 1721-1730.
LI X Y. Coupling, response and adaptation mechanism of soil-vegetation-hydrology in arid areas [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2011, 41(12): 1721-1730.
- [3] 蔡崇法, 王峰, 丁树文, 等. 间作及农林复合系统中植物组分间养分竞争机理分析[J]. *水土保持研究*, 2000, 7(3): 219-221, 252.
CAI C F, WANG F, DING S W, et al. Nutrients competition and its action mechanism between component parts in inter cropping systems and agroforestry[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2000, 7(3): 219-221, 252.
- [4] BROOKER R W, BENNETT A E, CONG W F, et al. Improving intercropping: A synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology [J]. *The New Phytologist*, 2015, 206(1): 107-117.
- [5] WEN Z, WU J N, YANG Y Z, et al. Implementing intercropping maintains soil water balance while enhancing multiple ecosystem services [J]. *Catena*, 2022, 217: e106426.
- [6] ABID K J, LHOMME J P, MASMOUDI M M, et al. Water balance of the olive tree-annual crop association: A modeling approach [J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(5): 575-586.
- [7] WANG Z Q, LIU B Y, LIU G, et al. Soil water depletion depth by planted vegetation on the Loess Plateau [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, 52(6): 835-842.
- [8] LING Q, GAO X D, ZHAO X N, et al. Soil water effects of agroforestry in rainfed jujube (*Ziziphus jujube* Mill.) orchards on loess hillslopes in Northwest China [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2017, 247: 343-351.
- [9] CARDINAEL R, MAO Z, PRIETO I, et al. Competition with winter crops induces deeper rooting of walnut trees in a Mediterranean alley cropping agroforestry system [J]. *Plant and Soil*, 2015, 391(1): 219-235.
- [10] GAO X D, LIU Z P, ZHAO X N, et al. Extreme natural drought enhances interspecific facilitation in semiarid agroforestry systems [J]. *Agriculture*, 2018, 265: 444-453.
- [11] WANG Y P, HAN X Y, YAN W M, et al. Apple trees

- can extract soil water from both deep layers and neighboring cropland in the tableland region of Chinese Loess Plateau [J]. *Catena*, 2023, 232: e107396.
- [12] 史录印, 高小松, 徐志达. 长武县苹果产业现状、问题与对策[J]. *陕西农业科学*, 2011, 57(5): 147-150.
SHI L Y, GAO X S, XU Z D. Present situation, problems and countermeasures of apple industry in Changwu County [J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2011, 57(5): 147-150.
- [13] WANG Y Q, SHAO M G, LIU Z P, et al. Characteristics of dried soil layers under apple orchards of different ages and their applications in soil water managements on the Loess Plateau of China [J]. *Pedosphere*, 2015, 25(4): 546-554.
- [14] 李玉山. 黄土高原土壤水分循环与农田生产力[M]. 西安: 陕西人民出版社, 2015: 347.
LI Y S. Soil water cycle and farmland productivity in the Loess Plateau [M]. Xi'an: Shaanxi People's Press, 2015: 347.
- [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.
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.
- [16] LIU W Z, ZHANG X C, DANG T H, et al. Soil water dynamics and deep soil recharge in a record wet year in the southern Loess Plateau of China [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(8): 1133-1138.
- [17] HAN X Y, LIU W Z, LIN W. Spatiotemporal analysis of potential evapotranspiration in the Changwu tableland from 1957 to 2012 [J]. *Meteorological Applications*, 2015, 22(3): 586-591.
- [18] 王锐, 刘文兆, 李志. 黄土塬区 10 m 深剖面土壤物理性质研究[J]. *土壤学报*, 2008, 45(3): 550-554.
WANG R, LIU W Z, LI Z. Physical properties of soils along a 10 m deep soil profile in loess tableland [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(3): 550-554.
- [19] ZHU Y J, JIA X X, SHAO M G. Loess thickness variations across the Loess Plateau of China [J]. *Surveys in Geophysics*, 2018, 39(4): 715-727.
- [20] 赵涛, 王长安. 长武县苹果产业高质量发展建议和对策[J]. *果树资源学报*, 2022, 3(4): 70-73.
ZHAO T, WANG C A. Suggestion and countermeasure for high quality development of apple industry in Changwu County [J]. *Journal of Fruit Resources*, 2022, 3(4): 70-73.
- [21] 王亚萍. 黄土塬区农田-果园镶嵌布局深剖面土壤水分时空分布及影响因素[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
WANG Y P. Spatiotemporal distribution and influencing factors of soil water content in cropland-apple orchard mosaic pattern in the Loess tableland of China [D]. Yanling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2021.
- [22] WANG Y Q, SHAO M A, LIU Z P, et al. Regional spatial pattern of deep soil water content and its influencing factors [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2012, 57(2): 265-281.
- [23] METZGER J C, WUTZLER T, DALLA VALLE N, et al. Vegetation impacts soil water content patterns by shaping canopy water fluxes and soil properties [J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31(22): 3783-3795.
- [24] CHENG R R, CHEN Q W, ZHANG J G, et al. Soil moisture variations in response to precipitation in different vegetation types: A multi-year study in the Loess Hilly Region in China [J]. *Ecohydrology*, 2020, 13(3): e2196.
- [25] ROBINSON N, HARPER R J, SMETTEM K R J. Soil water depletion by *Eucalyptus spp.* integrated into dryland agricultural systems [J]. *Plant Soil*, 2006, 286(1/2): 141-151.
- [26] SHEN Q, GAO G Y, FU B J, et al. Soil water content variations and hydrological relations of the cropland-treebelt-desert land use pattern in an oasis-desert ecotone of the Heihe River Basin, China [J]. *Catena*, 2014, 123(1): 52-61.
- [27] LIU Z Q, JIA G D, YU X X. Water uptake and WUE of Apple tree-Corn Agroforestry in the Loess hilly region of China [J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 234: e106138.
- [28] WU W J, LI H J, FENG H, et al. Precipitation dominates the transpiration of both the economic forest (*Malus pumila*) and ecological forest (*Robinia pseudoacacia*) on the Loess Plateau after about 15 years of water depletion in deep soil [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 297: e108244.
- [29] JIA X X, SHAO M A, ZHU Y J, et al. Soil moisture decline due to afforestation across the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 546: 113-122.
- [30] 杨磊, 张子豪, 李宗善. 黄土高原植被建设与土壤干燥化: 问题与展望[J]. *生态学报*, 2019, 39(20): 7382-7388.
YANG L, ZHANG Z H, LI Z S. Effects of large-scale re-vegetation on soil desiccation in the Loess Plateau: Problems and perspectives [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20): 7382-7388.
- [31] CHENG L P, SI B C, WANG Y P, et al. Groundwater recharge mechanisms on the Loess Plateau of China: New evidence for the significance of village ponds [J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 257: e107148.

(下转第 215 页)

- XU L, HE N P, YU G R. A dataset of carbon density in Chinese terrestrial ecosystems(2010s)[J]. *China Scientific Data*, 2019, 4(1): 90-96.
- [20] SHI M J, WU H Q, FAN X, et al. Trade-offs and synergies of multiple ecosystem services for different land use scenarios in the Yili River valley, China[J]. *Sustainability*, 2021, 13(3): e1577.
- [21] DING Q L, CHEN Y, BU L T, et al. Multi-scenario analysis of habitat quality in the Yellow River Delta by coupling FLUS with InVEST model [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(5): e2389.
- [22] ALAM S A, STARR M, CLARK B J F. Tree biomass and soil organic carbon densities across the Sudanese woodland savannah: A regional carbon sequestration study[J]. *Journal of Arid Environments*, 2013, 89: 67-76.
- [23] 陈光水, 杨玉盛, 刘乐中, 等. 森林地下碳分配(TBCA)研究进展[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2007, 2(1): 34-42.
- CHEN G S, YANG Y S, LIU L Z, et al. Research review on total belowground carbon allocation in forest ecosystems[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2007, 2(1): 34-42.
- [24] 曹秀凤. 基于生态安全格局和 PLUS 模型的合肥市国土空间生态修复成效评价[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- CAO X F. Evaluation of ecological restoration effects of land use in Hefei City based on ecological security pattern and the PLUS Model[D]. Changchun: Jilin University, 2023.
- [25] 李苗, 臧淑英, 万鲁河, 等. 哈尔滨市城乡结合部土地利用时空变化[J]. *测绘科学*, 2018, 43(6): 52-57.
- LI M, ZANG S Y, WAN L H, et al. Spatial-temporal variation of land use in rural-urban continuum of Harbin city[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2018, 43(6): 52-57.
- (上接第 204 页)
- [32] 温慧娟, 赵西宁, 高飞. 黄土高原不同降水量区苹果园土壤干燥化效应及生产水足迹模拟[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(7): 1927-1936.
- WEN H X, ZHAO X N, GAO F. Simulation of soil desiccation effects and production water footprint of apple orchards in different precipitation areas of the Loess Plateau, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(7): 1927-1936.
- [33] YI J, ZHAO Y, SHAO M A, et al. Hydrological processes and eco-hydrological effects of farmland-forest-desert transition zone in the middle reaches of Heihe River Basin, Gansu, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 529: 1690-1700.
- [34] 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.
- 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.
- [26] 金浩宇, 鞠琴, 曲珍, 等. 长江源区 1980—2010 年土地利用变化及影响分析研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(4): 78-85.
- JIN H Y, JU Q, QU Z, et al. Land use change and impact analysis in the source region of the Yangtze River from 1980 to 2010[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2019, 30(4): 78-85.
- [27] 庄大方, 刘纪远. 中国土地利用程度的区域分异模型研究[J]. *自然资源学报*, 1997, 12(2): 105-111.
- ZHUANG D F, LIU J Y. Study on the model of regional differentiation of land use degree in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 1997, 12(2): 105-111.
- [28] 位贺杰, 杨一鸣, 吴群. 多雾霾城市绿地空气净化服务与景观格局的关系: 以河南省安阳市区为例[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(4): 292-299, 309.
- WEI H J, YANG Y M, WU Q. Relationship between air purification service and landscape pattern of urban green space in city with more haze: Taking Anyang urban area of He'nan Province as an example[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(4): 292-299, 309.
- [29] 王永琪, 马姜明. 基于县域尺度珠江—西江经济带广西段土地利用变化对生态系统服务价值的影响研究[J]. *生态学报*, 2020, 40(21): 7826-7839.
- WANG Y Q, MA J M. Effects of land use change on ecosystem services value in Guangxi section of the Pearl River-West River Economic Belt at the county scale[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(21): 7826-7839.
- [30] 李振瑜, 张建军, 耿玉环. 基于空间关系的长江经济带城市群生态效应扩散研究[J]. *中国农业大学学报*, 2017, 22(1): 161-171.
- LI Z Y, ZHANG J J, GENG Y H. Effects of ecological diffusions of cities around Yangtze River economic belt basing on spatial relation [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2017, 22(1): 161-171.