

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.01.009; CSTR:32311.14.rswc.2025.01.009.

王子涵, 龚铭, 池金铭, 等. 黄土残塬沟壑区人工林小流域土壤水分时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1): 92-100.

Wang Zihan, Gong Ming, Zhao Jiongchang, et al. The spatiotemporal variations in soil moisture of artificially afforested areas in small watershed of the gully region in the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1): 92-100.

黄土残塬沟壑区人工林小流域土壤水分时空变化特征

王子涵^{1,2}, 龚 铭¹, 赵炯昌^{1,2}, 池金铭^{1,2}, 朱洪盛^{1,2},
左启林³, 王丽平^{1,2}, 王百群⁴, 于 洋^{1,2}

(1.北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2.山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100083;
3.中建一局集团第三建筑有限公司, 北京 100161; 4.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: [目的] 了解残塬沟壑小流域土壤水分的时空分布特征, 开展生态建设和探究水文过程对气候—植被—地貌综合效应的敏感性至关重要。[方法] 以地处山西吉县蔡家川的人工林小流域为研究区, 基于流域尺度野外定位监测与地统计等方法, 分析了小流域土壤水分时空变化特征。[结果] (1) 研究时段内总降雨历时为 308 h, 累计降雨量 311.1 mm, 占全年降雨量的 77.95%, 小流域土壤水分变化具有明显的垂直分异特征。(2) 采用有序最优分割法将人工林小流域土壤水分分为三层, 其中, 0—10 cm 为土壤水分活跃层, 其体积含水量均值为 $(13.91 \pm 4.08) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ($\text{CV}=29\%$), 10—80 cm 为土壤水分次活跃层, 其体积含水量均值为 $(16.28 \pm 5.01) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ($\text{CV}=31\%$), 80—180 cm 为土壤水分调节层, 其体积含水量均值为 $(14.25 \pm 1.89) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ($\text{CV}=13\%$)。 (3) 人工林小流域不同深度土壤水分呈现出西北低、东南高的特点。反距离权重法土壤水分空间插值的精确度最高, 纳什系数为 0.52, 均方根误差为 2.04。[结论] 蔡家川人工林小流域的水分空间分布受到地形、降水和植被等多方面因素的影响, 水分空间分布总体上呈现出东南高、西北低的特点。

关键词: 黄土高原; 土壤水分; 空间插值; 空间分布

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)01-0092-09

The spatiotemporal variations in soil moisture of artificially afforested areas in small watershed of the gully region in the Loess Plateau

Wang Zihan^{1,2}, Gong Ming¹, Zhao Jiongchang^{1,2}, Chi Jinming^{1,2}, Zhu Hongsheng^{1,2},
Zuo Qilin³, Wang Liping^{1,2}, Wang Baiqun⁴, Yu Yang^{1,2}

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100085, China; 2. Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station, CNERN, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing, 100085, China; 3. The Third Construction Co., Ltd., China Construction First Group, Beijing 100161, China; 4. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] Soil moisture plays a vital role in influencing vegetation recovery, particularly in the loess plateau gully erosion region, where hydrological processes are highly responsive to the combined effects of climate, vegetation, and topography. The aims of this study are to understand the spatiotemporal distribution characteristics of soil moisture at the watershed scale, and to advance ecological construction efforts. [Methods] This research investigated the artificial afforestation watershed in Caijiachuan, Jixian County, Shanxi Province, based on the soil moisture positioning monitoring platform. By conducting

收稿日期: 2024-03-13

修回日期: 2024-03-30

资助项目: 国家自然科学基金(42177310; 42377331); 国家重点研发计划(2023YFF1305101)

第一作者: 王子涵(2002—), 男, 内蒙古克什克腾旗人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与流域治理研究。E-mail: wzh0301208@gmail.com

通信作者: 于洋(1985—), 男, 河北承德人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持与流域治理研究。E-mail: yangyu@bjfu.edu.cn

王百群(1968—), 男, 陕西渭南人, 副研究员, 主要从事土壤养分循环研究。E-mail: bqwang@ms.iswc.ac.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

watershed-scale field positioning monitoring and employing various geostatistical analysis methods, we systematically gathered soil moisture datasets of growing season in the afforested watershed in 2023. Employing diverse interpolation techniques, we analyzed the spatiotemporal variations of soil moisture at the small watershed scale. [Results] The small watershed-scale soil moisture changes were highly responsive to rainfall, showcasing distinct vertical stratification characteristics. The soil moisture content in the Caijiachuan afforestation watershed was categorized into three layers: the active soil moisture layer (0—10 cm), the sub-active soil moisture layer (10—80 cm), and the soil moisture regulation layer (80—180 cm). The sub-active soil moisture layer exhibited the highest coefficient of variation, while the soil moisture regulation layer had the lowest variation coefficient. The active soil moisture layer was predominantly influenced by climate, the sub-active layer served as the primary layer for vegetation water absorption, and the regulation layer primarily functions as a water storage layer. In terms of interpolation method selection, the inverse distance weighting method yielded the most accurate results for the spatial distribution of soil moisture within the watershed, with a Nash coefficient of 0.64 and a root mean square error of 3.22, establishing it as the preferred interpolation method among the four considered. Upon stratifying the soil in the Caijiachuan afforestation watershed into three layers and conducting interpolation analysis, It was observed that the sub-active soil moisture layer had the highest water content, while the active soil moisture layer had the lowest water content. [Conclusion] The spatial distribution of water in the study area is influenced by many factors such as topography, precipitation and vegetation, and the spatial distribution of water is generally characterized by high in the southeast and low in the northwest.

Keywords: Loess Plateau; soil moisture; spatial interpolation; spatial distribution of soil moisture

土壤水分在水量平衡中扮演着至关重要的角色,是制约植被恢复的关键环境要素,在脆弱地区生态恢复、退化土地植被重建过程中发挥关键作用。作为陆地生态系统水分循环的重要组成。土壤水分收支直接影响着地表径流和地下水的形成和补给,作为脆弱生态系统植被恢复的关键指标,在大规模生态建设的背景下,开展流域尺度土壤水分的时空变化特征研究能够为植被格局优化和流域综合治理提供依据。

黄土高原地区是我国典型的生态脆弱区,水土流失严重、土壤保持能力低,自 20 世纪 70 年代以来,针对黄土高原生态环境问题实施了大量的生态工程^[1],在大规模生态恢复的背景下,土壤水分对生态系统结构和功能的影响受到了人们的广泛关注^[2-4]。目前土壤水分不同观测方法得到观测值的准确性不同,何其华等比较了不同土壤水分测定的方法,并分析了不同环境因素对土壤含水量的影响^[5]。Saeed Ahmadi 等开展了原位土壤含水量和温度的测量,探究了不同土壤水分模拟方法的准确性^[6]。Caroline 等采用定点观测,细化了土壤湿度环境和森林结构的概况,表明土壤水分是森林小气候的驱动因素。事实上,土壤水分的变化并不随机,其受地形因素、植被因素和气候因素的影响会出现规律性的结果。师发苗等对青海省东部黄土区旱地造林背景下不同植被类型土壤水

分的变化进行了调查研究,发现相同条件下祁连侧柏林地的土壤含水量最高^[7]。王军等利用地统计学方法从土地利用、地形、降雨量和土壤物理性质等角度研究了黄土丘陵沟壑区小流域土壤水分的空间结构特征及其季节变化规律^[8]。陈洪松等利用室内人工降雨试验研究了土壤初始含水量对坡面降雨入渗、湿润锋运移及土壤水分再分布规律的影响。王会平等对坡面土壤水分变化格局和动态特征进行了研究,阐述了土壤水分坡面变化的规律^[9]。并且土壤水分监测点位置和数量的选择也会影响观测结果的科学性。李洪建等进行了长时间的土壤水分定位观测,观测结果表明生长期土壤水分动态主要受降水量及其分配的影响^[10]。Gertraud 等进行了为期 9 a 的定位观测试验,分析了土壤水分、降雨量和流量数据,并从土地利用和地形特征的角度对结果进行了解释。

山西吉县蔡家川流域地处黄土残塬沟壑区,该地区黄土层厚度较大,部分残塬由坚硬岩石或土壤组成,地表起伏不平,沟壑呈现出放射状或交错分布,植被相对薄弱,表现出典型的干旱气候特征。近些年来,围绕小流域的研究主要集中在径流输沙特征对雨型的响应、侵蚀沟分类及植被恢复特征研究、不同植被覆盖条件对流域输沙的影响等方面^[11-12]。对残塬沟壑区流域尺度开展土壤水分时空变化特征的报道

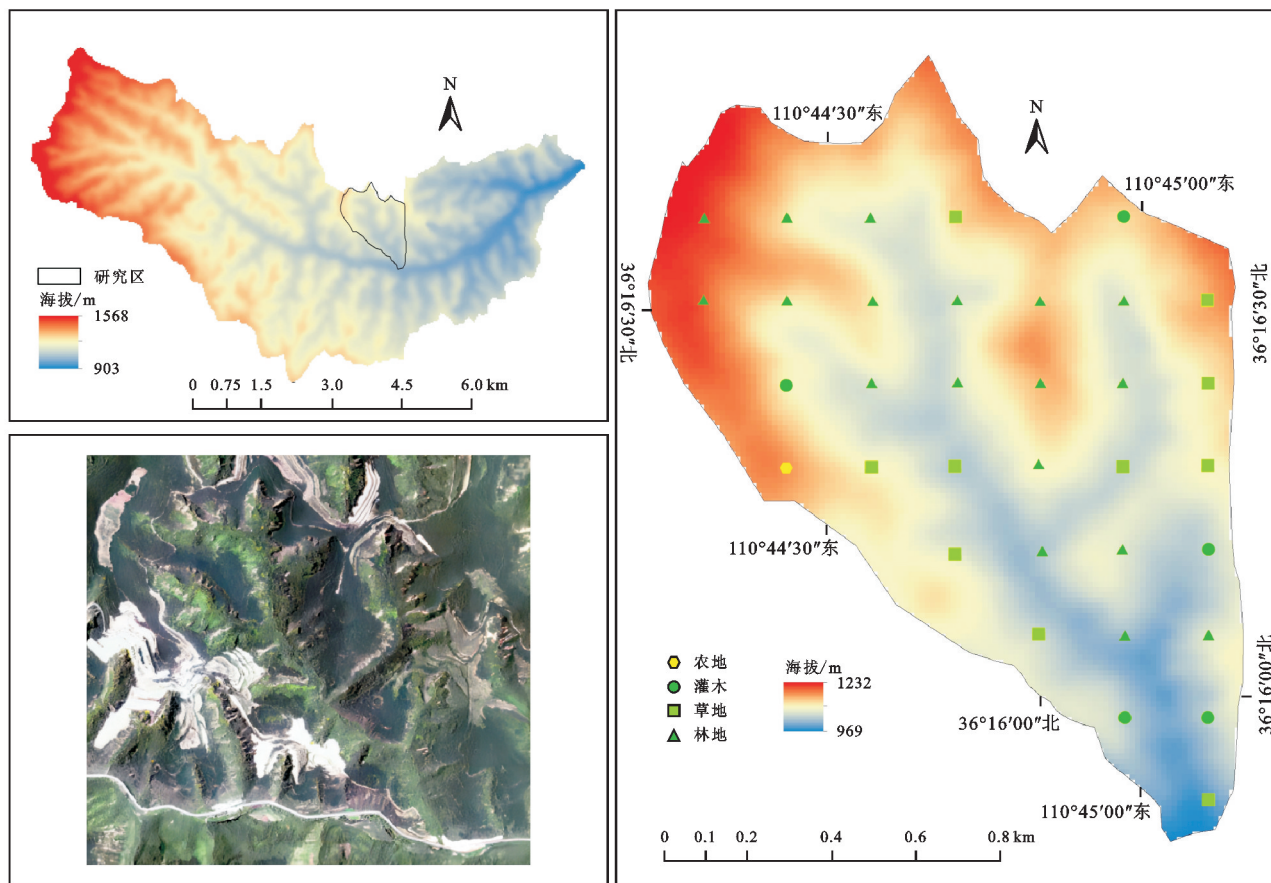
较少,本研究依托山西吉县蔡家川人工林小流域土壤水分定位监测平台,基于生长季小流域土壤水分动态监测,分析流域尺度水分的时空变化特征,为植被恢复和流域综合治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西吉县蔡家川流域,属于晋西黄土残垣沟壑区。如图 1 所示,流域地理坐标为 $110^{\circ}39'45''$ — $110^{\circ}39'45''$ E, $36^{\circ}14'27''$ — $36^{\circ}18'23''$ N,地势西高东低,流域呈东西走向,土壤母质类型为黄土,海拔为 900~1 590 m,流域面积为 40 km²。具有典型黄土高原气候特征,暖温带大陆性气候,年均降水量 577 mm,且集中在 7—9 月 3 个月,占全年降水量的 50% 以上。年均温 10℃,无霜期在 172 d 以上。研究区主要风向为东北风,冬季多西北风,干燥少雪。流域内植被类型以旱生植被为主,流域上游属于天然次生

林,中下游主要为乔木树种人工防护林,主要树种为刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)等,灌木层主要由黄刺玫(*Rosa xanthina*)、三裂绣线菊(*Spiraea trilobata*)、丁香(*Syringa oblata*)等组成,草本层以艾蒿(*Artemisia argyi*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)等为主的植物组成。其中,人工林小流域位于蔡家川流域的中部,海拔为 969~1 232 m,面积为 1.52 km²,地势西北高,东南低,流域呈南北走向。小流域人工林分为人工油松林、人工刺槐林以及人工侧柏刺槐混交林。乔木层植被主要有刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)等;灌木层植被主要有:黄刺玫(*Rosa xanthina*)、三裂绣线菊(*Spiraea trilobata*)和沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)等;草本层植被主要包括艾蒿(*Artemisia argyi*)和铁杆蒿(*Triplolium vulgare*)。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2016)2923 号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图 1 研究区概况

Fig. 1 Location of the study area

1.2 流域尺度土壤水分定位监测

根据小流域地形特征与人工林建设情况,于 2022 年 5—6 月采用网格法在流域尺度布设土壤水分定位监测点 34 个(图 1),采用 GPS 记录监测点坐

标,34 个水分定位监测样点中,人工乔木林共 18 个(其中包括刺槐 14 个,侧柏 4 个),草地 10 个,灌木地 5 个,农田 1 个。野外调查时详细记录每个定位监测点的坡度、坡向、坡位等地形因子与植被信息,测定

样地的经纬度和海拔。土壤水分定位监测主要采用时域反射仪测定 0—180 cm 的浅层体积含水量,共分为 10 个土层深度(0—10, 10—20, 20—40, 40—60, 60—80, 80—100, 100—120, 120—140, 140—160, 160—180 cm)。监测于 2023 年生长季(5—10 月)全面开展,每两周测定一次。在人工林流域出口布设自计雨量筒进行降雨过程的同步观测,于生长季结束后对降雨数据进行采集。并在人工林小流域内采集浅层土壤样本,采用环刀法测定土壤容重,采用重铬酸钾—外加热法测定土壤有机质含量,采用 pH 酸度计电位法测量土壤 pH,使用激光粒度分析仪测定

土壤机械组成。

1.3 数据统计与分析

1.3.1 聚类分析 本研究采用有序聚类方法中的最优分割法—Fisher 法对土壤水分进行垂直分层,有序聚类法是一种常用的聚类分析方法^[13-15],用于将数据集中的样本分成不同的群集(Cluster)。有序聚类法会考虑样本本身具有的时间和空间顺序。有序聚类方法具体描述见下文所述。

将生长季人工林小流域各土壤观测层的水分观测值有序排列构成向量,得到不同深度下的水分含量变化矩阵,如表 1 所示。

表 1 土壤水分向量排列结果

Table 1 Vector permutations

编号	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
土层深度/cm	0—10	10—20	20—40	40—60	60—80	80—100	100—120	120—140	140—160	160—180

得到土壤水分含量向量后,需定义一个新类别,包括 $\{X_i, \dots, X_j\}$ (其中 $i \leq j \leq 10$),定义该层土壤的直径是该层样本的离差平方和,即:

$$D(i, j) = \sum_{l=1}^j (x_l - \bar{x}_{ij})' (x_l - \bar{x}_{ij}) \quad (1)$$

$$\bar{x}_{ij} = \frac{1}{j-i+1} \sum_{l=i}^j x_l \quad (2)$$

假设将总体 n 个样本分成 m 类,则有 $\{i_1 = 1, i_1 + 1 = 2, \dots, i_2 - 1\} \{i_2, i_2 + 1, \dots, i_3 - 1\} \dots \{i_k, i_k + 1, \dots, i_{k-1} - 1\} \dots \{i_m, i_m + 1, \dots, n\}$,则可以定义此种分类方法的误差函数为:

$$\partial[p(m, n)] = \sum_{k=1}^m D(i_k, i_{k+1} - 1) \quad (3)$$

式中: $\partial[p(m, n)]$ 为分类结果的误差函数; m 为样本类数; n 为总体样本个数; i_k 为第 k 类中第 1 个样本。

假设将总体 n 个样本分成 2 类时,即 $m = 2$,需要确定一个分界向量 j ,使得以该向量划分界限得到的误差函数值最小,即:

$$\partial[p_0(2, n)] = \min_{2 \leq j \leq n} \{D(1, j-1) + D(j, n)\} \quad (4)$$

由此可以得出递推公式:

$$\partial[p_0(m, n)] = \min_{m \leq j \leq n} \{\partial[p_0(m-1, j-1)] + D(j, n)\} \quad (5)$$

由式(5)即可得出不同分类层之间的分界向量,即可得出最优有序分类结果。

1.3.2 小流域尺度土壤水分空间插值 采用不同的插值方法对人工林小流域土壤水分空间分布进行插值分析,对流域土壤水分时空特征进行制图,并对不同插值方法(反距离权重法、克里金插值法、样条函数法和趋势面法)的插值精度进行比较,

其中,反距离权重法是对采样点进行线性加权来决定输出的栅格方法,其权重与距离成反比^[16]。该

方法的数学表达式如下:

$$\hat{Z}(u) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{d(u, u_i)^P}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d(u, u_i)^P}} \quad (6)$$

式中: $\hat{Z}(u)$ 是未知点 u 的估计值; Z_i 是已知点 u_i 的值; $d(u, u_i)$ 是未知点 u 与已知点 u_i 之间的距离; P 是一个指数参数,用于控制距离的权重。

克里金法是一种假定采样点之间的距离或方向可用于说明空间变化的相关性的插值方法^[17],其将数学函数拟合到指定数量的点,以确定每个位置的输出值。该方法的数学表达式如下:

$$Z_v(x) = \sum_{j=1}^n \lambda_j(x_j) \quad (7)$$

式中: $Z_v(x)$ 是空间任意一点的估计值; λ_j 是权重系数; x_j 是第 j 点位的实际观测值。

样条函数法是一种分段拟合的插值方法,与其他插值方法相比,其具有计算量小,操作简单的特点,其通常用于具有光滑表面区域的插值^[18]。该方法的数学表达式如下:

$$Z(x_0) = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} C_{ij} S_{nx} S_{ny} \quad (8)$$

式中: $Z(x_0)$ 是指定点的拟合值; n 为 y 方向上的节点数; m 为 x 方向上的节点数; C_{ij} 是相关系数; S_{nx} 和 S_{ny} 分别是两个 n 次基函数。

趋势面法:趋势面拟合法是采用简单的幂级多项式来拟合较粗糙表面的一种插值方法,其具有削弱插值表面粗糙度的作用^[18]。该方法的数学表达式如下:

$$Z(X, Y) = \sum_{k=0}^n \sum_{j=0}^k a_{kj} X^{k-j} Y^j \quad (9)$$

式中: $Z(X, Y)$ 为点 (X, Y) 的拟合值; k 为具有观测值的点位数; a_{kj} 为拟合系数。

1.3.3 插值结果验证 本研究采用随机子集采样交叉验证法,随机地将数据集分成训练集和验证集,训练集占总体数据量的 75%(26 个),验证集占总体数据的 25%(8 个)。首先使用训练集点数据进行空间插值运算,得到整个流域的栅格预测值,然后将验证集点数据的真实值与对应栅格的预测值进行比较。最后本研究选用平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)和纳什系数(E_{ns})作为指标进行检验与误差分析,MAE 和 RMSE 的具体指标计算过程如下:

$$MAE=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n|p_{ip}-p_i|$$

(10)

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(P_i-P_{ip})^2}{n}}$$

(11)

式中: n 表示验证点集的点位总数; P_{ip} 表示第 i 点的预测值; P_i 表示第 i 点的真实值。

纳什系数计算:纳什系数 E_{ns} 对不同插值方法得到的土壤含水量空间分布图进行不确定性评价, E_{ns} 反映插值模拟的准确程度,当 $E_{ns}>0.50$ 时结果可以接受, E_{ns} 越接近 1,则证明插值精度越高。

$$E_{ns}=1-\frac{\sum_{j=1}^n(Q_{oj}-Q_{sj})^2}{\sum_{j=1}^n(Q_{oj}-\overline{Q_o})^2}$$

(12)

式中: Q_{oj} 表示 j 号点位的水分观测值; Q_{sj} 表示 j 号点位的水分模拟值; $\overline{Q_o}$ 表示水分观测的总平均值; n 表示点位总数。

2 结果与分析

2.1 人工林小流域降雨特征

2023 年人工林小流域降雨特征如图 2 所示,全年共监测降雨事件 89 次,总降雨量为 398.7 mm。生长季内,共发生降雨事件 58 次,总降雨历时为 308 h,累计降雨量 311.1 mm,占全年降雨量的 77.95%。生长

季平均降雨强度、最大 10 min 降雨强度和最大 30 min 降雨强度分别为 1.43 mm/h、86.4 mm/h 和 50.8 mm/h。平均雨强变化范围为 0.12~10.8 mm/h。其中 8 月发生了 14 次降雨事件,降雨量为 101.3 mm,占整个生长季降雨量的 32.56%。

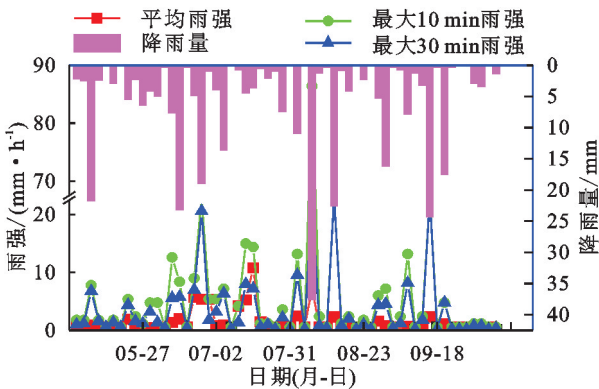


图 2 蔡家川人工林小流域生长季降水情况

Fig. 2 Growing season precipitation in the Caijiachuan plantation forest sub-basin

2.2 土壤水分垂直分层

由表 2 可知,有序最优分割的分类误差函数曲线在分类数为 3,4 的时候出现了明显的拐点,最优损失函数比值在分类数为 3 时更大,并且根据有序聚类 j 值表(表 3)可知,分类数为 3 时为最优分类结果,因此本研究将流域尺度土壤水分分为三层,其中 0—10 cm 为土壤水分活跃层,10—80 cm 为土壤水分次活跃层,80—180 cm 为稳定层土壤水分调节层。

表 2 有序最优分割结果

Table 2 Sequential clustering results		
分类数	误差函数	最优分割结果
2	25.38	1~5,6~10
3	16.29	1,2~5,6~10
4	10.74	1,2~4,5~6,7~10
5	6.94	1,2,3~4,5~6,7~10
6	3.90	1,2,3~4,5,6~7,8~10
7	2.01	1,2,3,4,5,6~7,8~10
8	0.89	1,2,3,4,5,6,7~8,9~10
9	0.25	1,2,3,4,5,6,7,8,9~10

表 3 有序聚类 j 值表

Table 3 Values of j in sequential clustering										
分类数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1										
2										
3		2								
4		2	4							
5		2	5	5						
6		5	5	5	6					
7		6	6	6	6	7				
8		6	6	6	6	7	8			
9		6	6	7	7	8	8	9		
10		6	6	7	7	8	8	9	9	

流域尺度不同深度土壤水分分层特征如表 4 所示,0—10 cm,10—80 cm 和 80—180 cm 土壤体积含水率平均值分别为 $(13.91\pm 4.08)\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $(16.28\pm 5.01)\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $(14.25\pm 1.89)\text{ cm}^3/\text{cm}^3$,变异系数分别为 29%,31%和 13%。10—80 cm 土壤水分及变异系数均高于 0—10 cm 和 80—180 cm。经过对土壤进行物理分析可知蔡家川人工林小流域浅层土壤容重为 $(1.11\pm 0.13)\text{ g}/\text{cm}^3$,土壤有机质质量分数为 $(10.34\pm 3.38)\text{ g}/\text{kg}$,土壤 pH 值为 8.27,砂粒、黏粒和粉粒体积百分比分别为 21%,11%和 68%。经过计算,得到人工林流域田间持水量约为 35.7%,萎蔫系数约为 12.1%,有效水含量为 23%。

表 4 土壤体积含水量描述性统计特征

Table 4 Descriptive statistical characteristics of soil volume water content

土层/cm	平均值/ ($\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$)	标准差/ ($\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$)	变异 系数/%
0—10	13.91	4.08	29
10—80	16.28	5.01	31
80—180	14.25	1.89	13

2.3 土壤水分时空分布特征

人工林小流域生长季土壤水分空间分布如图 3 所示,由图可知 2023 年研究区不同层次的土壤含水量空间分布均呈现出自东南向西北逐渐降低的变化趋势。其中,研究区西北部第 1 层、第 2 层和第 3 层的土壤体积含水率变化范围分别为 9.11~15.27 cm^3/cm^3 , 11.50~17.88 cm^3/cm^3 , 10.49~17.13 cm^3/cm^3 。研究区东南部第 1 层、第 2 层和第 3 层的土壤体积含水率变化范围分别为 14.60~20.78 cm^3/cm^3 , 15.67~20.92 cm^3/cm^3 , 12.48~19.09 cm^3/cm^3 。

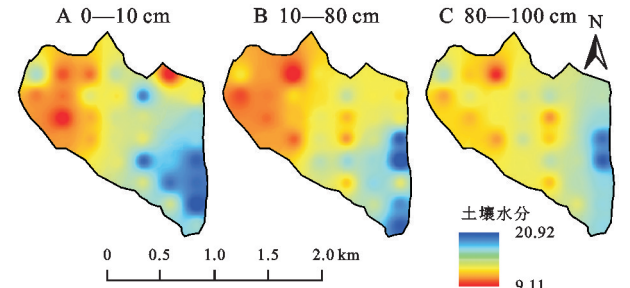


图 3 蔡家川人工林小流域生长季土壤水分空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of soil moisture in small watershed of Caijiachuan plantation during growing season

采用克里金插值法、样条函数法和趋势面法对人工林小流域土壤水分时空分布进行插值分析,结果如表 5 所示。反距离权重法、克里金插值法、样条函数法和趋势面法插值结果的平均绝对误差分别为 1.44, 1.60, 2.03, 1.69。由表 6 可知,反距离权重法的纳什系数最高,为 0.52,样条函数法计算得到的纳什系数

最小,仅有 0.23。插值验证结果均方根误差最小的是反距离权重法,为 2.04,均方根误差最大的插值方法是样条函数法,为 2.59。

表 5 交叉验证结果

Table 5 Cross-validation results cm^3/cm^3

观测值	反距离权重 法预测值	克里金法 预测值	样条函数法 预测值	趋势面法 预测值
13.15	11.29	10.75	10.01	10.57
10.19	13.12	13.42	13.43	13.63
11.52	11.99	11.70	12.60	11.72
9.83	13.78	14.12	14.01	14.21
14.00	12.72	12.41	12.64	12.90
11.60	11.57	9.67	6.63	8.89
14.92	14.36	14.37	13.77	15.38
20.78	15.19	14.83	14.54	15.95
17.53	13.80	13.29	13.27	13.17
12.59	15.28	15.31	15.09	15.06
13.75	13.73	13.04	12.67	14.11
15.97	16.30	16.96	17.10	16.18
14.37	14.98	14.72	15.30	15.09
13.85	13.81	12.59	10.55	11.69
17.72	17.31	17.43	16.28	18.48
19.54	18.79	19.86	19.59	19.68
13.55	11.67	11.22	10.63	11.53
10.49	12.70	12.45	11.25	12.80
11.26	12.10	11.69	12.03	11.99
14.10	13.64	13.84	14.58	13.59
12.13	12.79	12.58	12.33	12.69
12.28	12.42	12.06	11.33	10.44
15.87	15.27	15.59	15.08	15.83
19.09	16.57	17.67	17.35	17.31

表 6 不同插值方法的准确性

Table 6 Accuracy test of different methods

插值方法	纳什 系数	标准差	平均绝对 误差	均方根 误差
反距离权重法	0.52	1.48	1.44	2.04
克里金法	0.44	1.56	1.60	2.21
样条函数法	0.23	1.65	2.03	2.59
趋势面法	0.44	1.46	1.69	2.22

3 讨论

3.1 土壤水分垂直分层

研究结果表明,人工林小流域土壤表层水分垂直变化可分为三层,分别为土壤水分活跃层、土壤水分次活跃层和土壤水分调节层,各层深度分别为 0—10 cm, 10—80 cm 和 80—180 cm。不同层次土壤的水分含量和动态性直接影响着植物根系的生长、生物活性的分布和活动以及土壤生态系统的稳定性。通过划分不同水分层次,可以更好地理解土壤水分对植物生长

和土壤生态系统的影响机制,为农业生产和生态环境管理提供科学依据。探究土壤水分活跃层的水分变化对于提高土壤肥力、保护水资源等具有重要意义。通过了解土壤水分稳定层的特性,可以制定更有效的水分调控策略和植被恢复计划,如土壤覆盖、排水措施等,以实现土壤保护、林业可持续发展和生态系统的健康维护。不同水分层次土壤的水分含量和动态性受到气候变化的影响程度也不同。因此,通过对土壤划分成不同水分层次的研究,可以更好地理解土壤在气候变化下的响应机制,为应对气候变化提供科学支持。由分层结果可知,活跃层土壤水分最低,次活跃层土壤水分的含水率最高。出现此种土壤水分垂直分布的原因与气象因素和植被因素密切相关^[19]。因土壤水分活跃层处于土壤表层,因此该层受降雨和太阳辐射影响最为明显^[10],其含水率变化与降雨期同步,含水率的最小值出现在持续干旱且温度较高的时期,正因该层土壤水分受气象条件影响十分剧烈,对植被生长作用不大,所以将此层定义为土壤水分活跃层。而土壤水分次活跃层处于 10—80 cm 处,该层主要为根系分布区。当出现降雨事件时,从上层土壤渗入的水分大都会储存在该层,如果出现因为植被根系在该层吸收水分导致该层土壤水分下降时,深层的土壤水分也可以通过水势梯度向该层运动^[20],以确保植被的正常生长。次活跃层水分变异系数最大,调节层土壤水分变异系数最小,仅为 13%。这与余新晓等^[21]的研究结果相接近,土壤水分分为 3 个作用层次,分别为土壤水分弱利用层($28\% < CV < 34\%$),土壤水分利用层($17\% < CV < 29\%$)和土壤水分调节层($16\% < CV < 21\%$);研究不同的是,本研究中位于第二层深度的土壤水分次活跃层变异系数大于其上层土壤水分活跃层的变异系数,这可能与研究区植被类型和观测时间尺度有关。并且本研究分层结果与李鹏等^[22]得出的黄土高原植被根系分布深度结果相近,因此基于已有实测数据将人工林小流域土壤水分划分为三层是合理的。

3.2 小流域土壤水分空间变化特征

对流域土壤水分空间分布进行插值分析,结果表明蔡家川人工林小流域的水分空间分布总体上呈现出东南高西北低的特点。这主要是由于人工林小流域西北部地区地势较高,且植被类型多为耗水量较大的乔木,所以此处水分含量较低,而流域东南部地势较低,植被类型以草地为主,并且此处处于该流域的水分汇集区,所以水分较高。由于本研究使用反距离

权重的空间插值方法,所以图中会出现水分极值点的情况,见图 3 中出现了颜色较深的圆形点位。这些颜色较深的点位正是流域中水分值较极端的点位,地形和植被是影响这些点位水分的主要因素^[23]。由于土壤水分会受到植被、地形或植被和地形共同作用的影响,尤其是研究区东南部受到小地形和小气候的影响明显^[24-25],其土壤水分含量较高,在图 3 中就呈现出了显著的高水分含量“热点”。胡良军等的研究表明,在较大区域尺度下,从植被和气候的相互关系来看,区域气候的水热情况分布是决定土壤水分变化的主要因素,而土壤水分的空间分布情况则决定了该地区的植被分布^[26]。本研究发现,在流域尺度上也基本符合胡良军等提出的规律,在研究区内由于水分在流域中的汇集作用,决定土壤水分分布的主要因素是地形因素如坡度、坡位等,而土壤水分是决定植被类型和其生长状况的主导因素,植被则通过蒸腾和蒸散作用反作用于土壤水分。

3.3 插值方法的比选

本研究使用交叉验证的方法对 4 种空间插值的结果进行了准确性验证,对于土壤水分含量预测准确度和纳什系数,按照其从大到小进行排序得到的结果为反距离权重法>克里金法>趋势面法>样条函数法。从几种插值结果对比分析可以看出,反距离权重法插值结果的精度要高于克里金插值法,得出这样的结果主要是因为反距离权重法不仅可以反映出地形因素对水分的影响,还可以对已有观测点水分的权重进行设置^[27],突出了水分在小流域空间尺度上的分布特征,从而得到精度较高的插值结果。克里金插值法虽然可以反映出地形对于水分的影响,但无法考虑已知点位和插值点之间的距离和范围因素,因此克里金插值法的精度仅次于反距离权重法。趋势面法的均方根误差仅小于反距离权重法,但是其准确度较低,这是因为趋势面法生成的插值表面通常是平滑的,因为它考虑了观测点之间的趋势,从而减少了插值表面的波动。当存在离群点时,趋势面法的准确性就会降低^[28-29],因为它会受到这些点的影响而产生不合理的插值结果。与趋势面法相反,样条函数法虽然通过使用分段多项式,可以确保插值结果在相邻的区域之间实现平滑的过渡,减少插值表面的不连续性,但样条函数法对离群点比较敏感^[30],可能导致插值结果受到异常值的影响较大。因此样条函数法的插值结果在 4 种插值结果中为精度最差的。所以反距离权重法最适用于开展小流域土壤水分空间

插值以及土壤水分制图。在后续定位监测过程中,还需开展长期野外观测工作,解析多重要素对小流域尺度土壤水分的影响。

本研究开展了流域尺度土壤水分垂直动态变化特征研究,将土壤划分为水分活跃层、水分次活跃层和水分调节层。能够从水分垂直变化角度开展植被恢复与水分的关系研究。对于小流域土壤水分空间分布,本研究采用了多种空间插值方法,并对其准确性进行了验证和比较,特别是对反距离权重法在精度上的优势进行了充分的分析和论证,这将有助于理解土壤水分空间变化规律,并为后续的水资源管理和生态环境保护提供了科学依据。

4 结论

蔡家川人工林小流域的土壤浅层水分含量可以分为土壤水分活跃层(0—10 cm)、土壤水分次活跃层(10—80 cm)和土壤水分调节层(80—180 cm)。其中变异系数最大是土壤水分次活跃层,变异系数最小的是土壤水分调节层。土壤水分活跃层受气候影响最剧烈,土壤水分次活跃层是植被吸收水分的主要层,而土壤水分调节层主要起到储蓄水分的作用。在插值方法选择方面,反距离权重法得到的流域内土壤水分空间分布结果的纳什系数为0.52,均方根误差为2.04,是4种插值方法中较为准确的插值方法。将蔡家川人工林小流域土壤分成三层并进行插值分析后,我们发现土壤水分次活跃层的水分含量最高,土壤水分活跃层的含水量最低,并且这三层的土壤水分空间插值结果均呈现出西北低,东南高的特点。

参考文献(References):

- [1] 刘国彬,上官周平,姚文艺,等.黄土高原生态工程的生态成效[J].中国科学院院刊,2017,32(1):11-19.
Liu G B, Shanguan Z P, Yao W Y, et al. Ecological effects of soil conservation in Loess Plateau[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017,32(1):11-19.
- [2] Zhou X L, Hu K M, Xiao H L, et al. Effects of vegetation on the spatiotemporal distribution of soil water content in re-vegetated slopes using temporal stability analysis[J]. Catena, 2024,234:107570.
- [3] Wang N, Bi H X, Peng R D, et al. Disparities in soil and water conservation functions among different forest types and implications for afforestation on the Loess Plateau[J]. Ecological Indicators, 2023,155:110935.
- [4] Feng T J, Wei T X, Keesstra S D, et al. Long-term effects of vegetation restoration on hydrological regulation functions and the implications to afforestation on the Loess Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2023, 330:109313.
- [5] 何其华,何永华,包维楷.干旱半干旱区山地土壤水分动态变化[J].山地学报,2003,21(2):149-156.
He Q H, He Y H, Bao W K. Research on dynamics of soil moisture in arid and semiarid mountainous areas[J]. Journal of Mountain Research, 2003,21(2):149-156.
- [6] Ahmadi S, Alizadeh H, Mojaradi B. Land surface temperature assimilation into a soil moisture-temperature model for retrieving farm-scale root zone soil moisture[J]. Geoderma, 2022,421:115923.
- [7] 师发苗,郭霞,邓磊.青海东部黄土区旱地造林土壤水分研究[J].青海农林科技,2023(4):75-78,90.
Shi F M, Guo X, Deng L. Study on soil moisture of arid land afforestation forests in the loess area of eastern Qinghai[J]. Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry, 2023,3(4):75-78,90.
- [8] 王军,傅伯杰,邱扬,等.黄土丘陵小流域土壤水分的时空变异特征:半变异函数[J].地理学报,2000,55(4):428-438.
Wang J, Fu B J, Qiu Y, et al. Spatiotemporal variability of soil moisture in small catchment on Loess Plateau: semi-variograms[J]. Acta Geographica Sinica, 2000,55(4):428-438.
- [9] 王会平,韩新生,徐秀琴,等.坡面土壤水分研究综述[J].宁夏农林科技,2023,64(8):42-45.
Wang H P, Han X S, Xu X Q, et al. A review of slope soil moisture research[J]. Journal of Ningxia Agriculture and Forestry Science and Technology, 2023,64(8):42-45.
- [10] 李洪建,王孟本,柴宝峰.黄土高原土壤水分变化的时空特征分析[J].应用生态学报,2003,14(4):515-519.
Li H J, Wang M B, Chai B F. Spatial and temporal characteristics of soil moisture dynamics in Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003,14(4):515-519.
- [11] Meißl G, Zieher T, Geitner C. Runoff response to rainfall events considering initial soil moisture-Analysis of 9-year records in a small Alpine catchment (Brixenbach Dvalley, Tyrol, Austria)[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2020,30:100711.
- [12] 赵宇辉,张建军,于洋,等.晋西黄土区蔡家川小流域切沟的空间分布及形态特征[J].农业工程学报,2022,38(4):151-158.
Zhao Y H, Zhang J J, Yu Y, et al. Spatial distribution and characteristics of the gullies in Caijiachuan watershed in loess region of Western Shanxi Province, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022,38(4):151-158.

- [13] 王信增,焦峰.基于有序聚类法的土壤水分剖面划分[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2011,39(2):191-196,201.
Wang X Z, Jiao F. Partition of soil moisture profiles based on sequential clustering method[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2011,39(2):191-196,201.
- [14] 邵孝侯,王宇,毕利东,等.基于最优分割理论的土壤水分有效性评价[J].农业工程学报,2010,26(3):106-111.
Shao X H, Wang Y, Bi L D, et al. Evaluation on soil water validity using optimum partitioning clustering method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010,26(3):106-111.
- [15] 李俊,毕华兴,李笑吟,等.有序聚类法在土壤水分垂直分层中的应用[J].北京林业大学学报,2007,29(1):98-101.
Li J, Bi H X, Li X Y, et al. Application of sequential clustering method in vertical dividing of soil moisture profiles[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007,29(1):98-101.
- [16] 陈柏含,文汉江,刘焕玲,等.不同地形下的大地水准面插值方法的比较[J].兰州交通大学学报,2019,38(4):114-119.
Chen B H, Wen H J, Liu H L, et al. Comparison of geoid interpolation methods on different topography[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2019,38(4):114-119.
- [17] 李山有,王振皓,卢建旗,等.考虑地震动空间相关性 & 大震震源效应的烈度场插值方法[J].哈尔滨工业大学学报,2023(10):1-16.
Li S Y, Wang Z H, Lu J Q, et al. Intensity field interpolation method considering spatial correlation of ground motion and source effect of large earthquakes[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023(10):1-16.
- [18] 赵传燕,冯兆东,南忠仁.陇西祖厉河流域降水插值方法的对比分析[J].高原气象,2008,27(1):208-214.
Zhao C Y, Feng Z D, Nan Z R. Modelling the temporal and spatial variabilities of precipitation in Zulihe river basin of the western Loess Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2008,27(1):208-214.
- [19] Xu L, Gao G Y, Wang X F, et al. Distinguishing the effects of climate change and vegetation greening on soil moisture variability along aridity gradient in the drylands of Northern China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2023,343:109786.
- [20] Ye S, Liu L, Li J Y, et al. From rainfall to runoff: the role of soil moisture in a mountainous catchment[J]. Journal of Hydrology, 2023,625:130060.
- [21] 余新晓,张建军,朱金兆.黄土地区防护林生态系统土壤水分条件的分析与评价[J].林业科学,1996,32(4):289-297.
Yu X X, Zhang J J, Zhu J Z. Analysis and evaluation of soil moisture condition of shelterbelt ecosystem in loess area[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1996,32(4):289-297.
- [22] 李鹏,李占斌,赵忠,等.渭北黄土高原不同立地上刺槐根系分布特征研究[J].水土保持通报,2002,22(5):15-19.
Li P, Li Z B, Zhao Z, et al. Researches on root distribution characters of *Robinia pseudoacacia* on different sites in Weibei Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2002,22(5):15-19.
- [23] Shi S H, Wang X L, Hu Z R, et al. Geographic detector-based quantitative assessment enhances attribution analysis of climate and topography factors to vegetation variation for spatial heterogeneity and coupling [J]. Global Ecology and Conservation, 2023,42: e02398.
- [24] Bai X, Jia X X, Jia Y H, et al. Modeling long-term soil water dynamics in response to land-use change in a semi-arid area[J]. Journal of Hydrology, 2020,585:124824.
- [25] Xu J P, Liu M X, Yi J, et al. Evaluating the soil hydraulic functions of vegetation restoration in a subtropical hilly catchment: insights from continuous soil moisture monitoring[J]. Journal of Hydrology, 2024,629:130578.
- [26] 胡良军,邵明安.黄土高原植被恢复的水分生态环境研究[J].应用生态学报,2002,13(8):1045-1048.
Hu L J, Shao M A. Review on water eco-environment in vegetation restoration in Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002,13(8):1045-1048.
- [27] Tan J B, Xie X Y, Zuo J Q, et al. Coupling random forest and inverse distance weighting to generate climate surfaces of precipitation and temperature with Multiple-Covariates[J]. Journal of Hydrology, 2021, 598:126270.
- [28] 贾玉娟.不同空间插值方法在沈阳地区降水插值的对比分析[J].黑龙江水利科技,2022,50(6):94-96.
Jia Y J. Comparative analysis of different spatial interpolation methods for precipitation interpolation in Shenyang Area[J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2022,50(6):94-96.
- [29] Liu H M, He B J, Gao S H, et al. Influence of non-urban reference delineation on trend estimate of surface urban heat island intensity: a comparison of seven methods[J]. Remote Sensing of Environment, 2023,296:113735.
- [30] 马轩龙,李春娥,陈全功.基于 GIS 的气象要素空间插值方法研究[J].草业科学,2008,25(11):13-19.
Ma X L, Li C E, Chen Q G. Study on the method of GIS based spatial interpolation of climate factors in China[J]. Pratacultural Science, 2008,25(11):13-19.