

黄土丘陵区治沟新造耕地土壤的水盐分异特征

柯增鸣¹, 马理辉², 焦峰², 颜秉龙³

(1.西安科技大学 地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 2.西北农林科技大学

水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.连云港市水利规划设计院有限公司, 江苏 连云港 222006)

摘要: [目的] 黄土丘陵区“治沟造地”工程形成的部分新造耕地面临着土壤盐碱化的风险, 探究新造耕地土壤水盐空间分异特征及其影响因素, 为预防和防治土壤盐碱化, 促进新造耕地可持续利用提供理论依据。[方法] 选择该区典型新造耕地, 沿沟头至沟口设置 6 个试验小区, 依次为采样点 1, 2, 3, 4, 5, 6, 利用网格法获取每个小区 0—20, 20—40 cm 深度的土壤样品, 采用多重分形方法分析新造耕地土壤水、盐空间分异特征。[结果] 新造耕地土壤水、盐含量沿沟头至沟口皆逐渐降低, 采样点 1, 2, 3 地块的平均土壤水分和平均盐分含量分别为 17.6% 和 0.81 g/kg, 分别比采样点 4, 5, 6 地块的平均值高 23.0% 和 14.1% ($p < 0.05$)。采样点 1, 2, 3 地块土壤水、盐的多重分形参数 D_1 小于采样点 4, 5, 6 地块, 而 ΔD 表现出相反的结果, 表明采样点 1, 2, 3 地块土壤水、盐的空间变异性均较高。浅的地下水影响深度是促进采样点 1, 2, 3 地块盐分在表层土壤积累的主要原因 ($p < 0.05$); 地形特征也是一个重要原因, 采样点 1, 2, 3 地块地形狭窄, 不利于排水, 易发生涝渍, 加剧了盐分积累 ($p < 0.05$)。此外, 采样点 1, 2, 3 地块可能受到较高盐分含量的坡面径流和泥沙侵入, 提高了该区域土壤水、盐分含量及其变异性。[结论] 地下水影响深度、地形特征及坡面径流泥沙是造成采样点 1, 2, 3 地块土壤水、盐含量及其空间变异性较高的主要原因。因此, 靠近沟头位置的新造耕地是未来土壤盐碱化预防的重点区域。

关键词: 治沟造地; 土壤水分; 土壤盐分; 空间变异; 多重分形方法

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)06-0081-08

中图分类号: S153, F301.2, S156

文献参数: 柯增鸣, 马理辉, 焦峰, 等. 黄土丘陵区治沟新造耕地土壤的水盐分异特征[J]. 水土保持通报, 2023, 43(6): 81-88. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.06.011; Ke Zengming, Ma Lihui, Jiao Feng, et al. Spatial distribution characteristics of soil water and salt in newly cultivated farmland under gully control in loess hilly region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(6): 81-88.

Spatial Distribution Characteristics of Soil Water and Salt in Newly Cultivated Farmland Under Gully Control in Loess Hilly Region

Ke Zengming¹, Ma Lihui², Jiao Feng², Yan Binglong³

(1.College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi

710054, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 710021,

China; 3.Lianyungang Water Resources Planning and Design Institute Co., Ltd., Lianyungang, Jiangsu 222006, China)

Abstract: [Objective] Part of the newly cultivated farmland formed by the “Gully Control and Land Reclamation” project is facing the risk of soil salinization in the loess hilly region. The spatial distribution characteristics of soil water and salt and their influencing factors were studied for preventing and controlling soil salinization, and promoting sustainable utilization of newly cultivated land. [Methods] A typical area of newly cultivated land was selected, and six experimental plots were established along a gully head to the gully mouth, with sampling points numbered sequentially from 1 to 6. The grid method was used to obtain soil samples from the 0—20 and 20—40 cm layers in each plot. The multifractal method was used to analyze the spatial distribution characteristics of soil water and salt. [Results] Soil water content and salt content gradually decreased from the gully head to the gully mouth. The mean soil water contents and salt contents at

收稿日期: 2023-05-16

修回日期: 2023-06-16

资助项目: 国家重点研发计划项目“水土流失型氮磷面源污染阻截技术与产品研发”(2017YFD0800502)

第一作者: 柯增鸣(1992—), 男(汉族), 陕西省旬阳市人, 博士, 讲师, 主要从事土壤水盐过程研究。Email: kezml1105@126.com。

通信作者: 马理辉(1979—), 男(汉族), 福建省省长汀县人, 博士, 副研究员, 主要从事水土资源高效利用研究。Email: gjzmlh@126.com。

sampling points 1, 2, and 3 were 17.6% and 0.81 g/kg, respectively, which were 23.0% and 14.1% higher than the respective values at sampling points 4, 5, and 6. Meanwhile, the multifractal parameters D_1 of soil water and salt at sampling points 1, 2, and 3 were less than the respective values at sampling points 4, 5, and 6. ΔD values showed the opposite result, indicating that the spatial variability of soil water and salt at sampling points 1, 2, and 3 were higher. The depth of groundwater influence was the main reason for increased accumulation of salt in the surface soil at sampling points 1, 2, and 3 ($p < 0.05$). The terrain characteristic was also an important reason ($p < 0.05$). The narrow terrain was not conducive to drainage, was prone to waterlogging, and exhibited exacerbated salt accumulation. In addition, sampling points 1, 2, and 3 may be invaded by slope runoff and sediment with high salt content that increased soil water, salt content, and variability in the area. [Conclusion] The depth of groundwater influence, terrain characteristics, and slope runoff sediment were important reasons for the high soil water content, salt content, and their spatial variability at sampling points 1, 2, and 3 in newly cultivated farmland. Thus, newly cultivated farmland near the gully head location would be a key area for preventing soil salinization in the future.

Keywords: gully control and land reclamation; soil water; soil salt; spatial variation; multifractal method

中国黄土丘陵区是全球土壤侵蚀严重区域之一。剧烈的土壤侵蚀导致该区以往生态环境严重破坏,土壤质量严重低下,土地资源严重破碎,农业产出严重不足^[1-4]。1999 年国家开始实施退耕还林(草)生态工程以来,该区的生态环境明显改善,植被覆盖度显著提高^[5],土壤侵蚀强度大幅降低,黄河输沙量更发生了历史性剧减^[6-8]。为了在退耕还林(草)工程实施后坡面侵蚀产沙量明显减少,传统淤地坝淤地年限大大延长、淤地效果锐减的变化下,进一步改善沟域环境,增加优质耕地数量,2008 年开始,该区实施了一项新兴的“治沟造地”工程。

治沟造地工程是通过大型机械挖取边坡土壤来填埋深度几米至几十米的沟壑,经过夯实碾压,在短时间形成大面积平坦土地,辅以水库、排洪渠和边坡护理等设施,形成可机耕的优质高产良田^[9]。截至 2018 年,治沟造地工程形成的新造耕地已达到 $3.30 \times 10^4 \text{ m}^2$ ^[10]。治沟造地工程也是集土地整治、水利、土壤培育、水土保持等工程于一体的综合性生态与民生工程,其中任何一项工程都影响着该工程整体效益的发挥,尤其是治沟造地的实践又先于研究,许多重要科学问题亟待解决,以保证治沟新造耕地顺利运行,安全管理,高效发挥应有的效益。已有研究表明,治沟造地工程抬升了地下水位,加之该区具有高的蒸散量,使部分新造耕地正在遭受土壤盐碱化的侵害^[11-12],严重影响着新造优质耕地最佳效益的有效发挥。

土壤盐碱化直接影响、威胁土壤质量和土壤生产力水平。在地形十分破碎的黄土丘陵区,如此大面积平坦、优质的新造耕地土壤水、盐分布如何,无疑需要继续不断加强研究、监测。土壤水盐在不同空间位置表现出差异,影响作物种植、田间管理^[10]。快速开展

了新造耕地土壤水盐空间分布特征研究,是实现区域可持续发展的重大科学需求。因此,本研究基于治沟新造耕地不同空间位置土壤水分和盐分数据,研究了土壤水盐在不同空间位置的空间分异特征,确定新造耕地土壤盐碱化重点预防区域,综合分析地下水影响深度、治沟造地工程特点、地形等因素对土壤水盐空间分布影响,为新造耕地土壤盐碱化预防提供基础数据,为新造耕地不同地理位置开展针对性的盐碱化防治措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黄土高原腹地的陕西省延安市安塞区南沟流域,属于典型黄土丘陵区。该地区为中温带大陆性半干旱季风气候^[13],平均海拔 1 371.9 m,年平均降水量 495 mm,年平均气温为 8.6 °C,年平均总日照时间为 2 395.6 h,年平均总辐射 493 kJ/cm²,年平均潜在蒸发量 1 463 mm(1984—2020 年)。

治沟造地工程产生的新造耕地是由大型机械从沟道两侧斜坡上挖掘土壤,在短时间内填满沟壑,经过多次夯实碾压形成的大面积耕地。本研究选择典型新造耕地—杏树窑子沟新造耕地(图 1),其建设完成于 2018 年,所有耕地全部种植苜蓿(*Medicago sativa*),每年收割 3 次,无灌溉、施肥等田间措施。新造耕地南侧有排水设施,北侧没有排水设施,北侧有 4 条坡沟,其中沟道 4 与采样地块 5,6 中间的排水设施相连。治沟新造耕地土壤理化性质如表 1 所示。根据国际制土壤质地分级标准,整个土层土壤均为砂质黏壤土。

1.2 试验设计与样品采集

在杏树窑子沟新造耕地(图 1),沿沟头至沟口,

划分 6 个地块,面积依次为 1.10,1.40,1.04,4.04,3.75 和 5.00 hm²。在每个地块布设 1 个采样小区,分别命名为采样点 1,2,3,4,5 和 6。每个小区面积为 3 600 m²,并用 15 m×15 m 网格划分为 16 个网格,每个采样点都位于网格中心点。使用直径 4 cm 的土钻采取 0—20 cm 和 20—40 cm 土层土壤样品,用于测定土壤水分与盐分。在取样完成后,采样孔需用土壤回填。采样时间选择长期没有降雨的干旱时期,于 2020 年 7 月 8—10 日完成土壤样品采集工作。

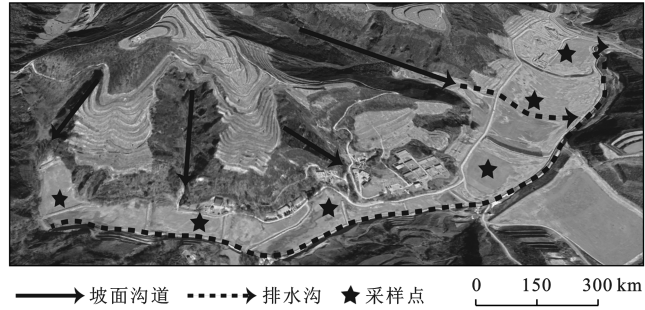


图 1 新造耕地地形地貌及采样点分布

Fig.1 Landform and sampling sites distribution in newly cultivated farmland

表 1 治沟新造耕地土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil in newly cultivated farmland

土层/cm	容重/ (g·cm ⁻³)	有机质含量/ (g·kg ⁻¹)	pH 值	饱和导水率/ (10 ⁻³ mm·min ⁻¹)	粒径组成/%		
					黏粒 (<0.002 mm)	粉粒 (0.02~2 mm)	砂粒 (0.02~2 mm)
0—20	0.91	6.81	8.40	191.3	16.96	23.12	59.92
20—40	1.07	5.76	8.38	49.13	16.59	22.93	60.48

1.3 地下水影响深度

测定了新造耕地不同空间位置地下水影响深度,由于野外试验条件限制等原因,测定地下水埋深困难。Jin 等^[12]利用地下水影响深度指标来代替地下水埋深,其测定方法是用土钻(直径 4 cm)从地面垂直向下钻取土芯,在土芯钻取过程中,当土芯含水量明显达到饱和时,认为该土层已到达地下水影响,并记录了从土壤表面到该层的深度,该指标能很好反映地下水埋深。同时,根据 Jin 等^[12]研究表明该地区地下水的可溶性盐量为 450 mg/L。

1.4 土壤水分、盐分测定

研究表明土壤电导率和可溶性盐分含量呈显著的正相关关系^[14]。因此,选取 40 份土壤样品测定其电导率和可溶性盐分含量。土壤电导率(EC, μs/m)采用土壤电导计(DDS-307A,上海翼点科学仪器有限公司,中国)测定。具体方法为^[15]:①将土壤样品风干,通过 1 mm 网筛去除植物根系等杂质。②将土壤样品和蒸馏水按照 1:5 的比例溶解在一个密封的塑料瓶中,震荡 30 min。③静止 30 min 后,用电导计放入塑料瓶上层清液中测定电导率。土壤盐分含量采用重量法测定,具体方法详见《土壤农化分析》^[15]。建立电导率与可溶性盐分总量关系^[16],然后测定所有土壤样品的电导率。最后将电导率全部转换成土壤盐分含量。

$$\text{土壤盐分含量} = 0.004 \text{ 2EC} - 0.103 \text{ 2} \quad (1)$$

(n=40, R²=0.88, p<0.01)

1.5 数据处理

采用多重分形法分析土壤水分和盐分的空间变

异性,这里以土壤水分为例。具体方法为:

试验小区(60 m×60 m)被 15 m×15 m 的正方形网格划分为 16 个网格,每个网获取 1 个土壤水分数据。试验小区按尺度 ε=15 m,20 m,30 m 和 60 m 分别被划分为 16,9,4,1 个网格,每个网格内土壤水分数据计算平均值,对应分别有 16,9,4,1 个土壤水分数据(图 2)。首先,需要计算每个网格内土壤水分的质量比例 P_i(ε):

$$P_i(\epsilon) = \frac{Z_i}{\sum_{i=1}^{N(\epsilon)} Z_i} \quad (2)$$

式中:Z_i 为第 i 个网格的土壤水分含量;N(ε)为网格总数。

然后,计算广义维数 D_q 计算公式为:

$$D_q = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{1}{q-1} \times \frac{\lg[\sum_{i=1}^{N(\epsilon)} P_i(\epsilon) q]}{\lg \epsilon} \quad (q \neq 1) \quad (3)$$

$$D_1 = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \times \frac{\sum_{i=1}^{N(\epsilon)} P_i(\epsilon) \lg P_i(\epsilon)}{\lg \epsilon} \quad (q = 1) \quad (4)$$

式中:q 为概率密度权重指数,其值为整数(+∞, -∞),在本研究中,q 取值范围为-10≤q≤10。

通过研究土壤水分的 D_q-q 图,可以分析土壤水分是否具有多重分形特征,即当 q≥0 时,若 D_q 随 q 增大而逐渐减小,则土壤水分具有多重分形特征。D₁ 为信息熵,当 D₁ 较小时,表明土壤水分含量分布范围较大,具有相对较高的空间变异性;当 D₁ 相对较

小大时,表明土壤水分含量分布范围较小,具有相对较低的空间变异性^[17]。 $\Delta D(D_{-10}-D_{10})$ 可以评估土壤

水分在局部分布中空间变异强度。 ΔD 越大,表明土壤水分在局部分布中空间变异强度较大,反之则相反^[18]。

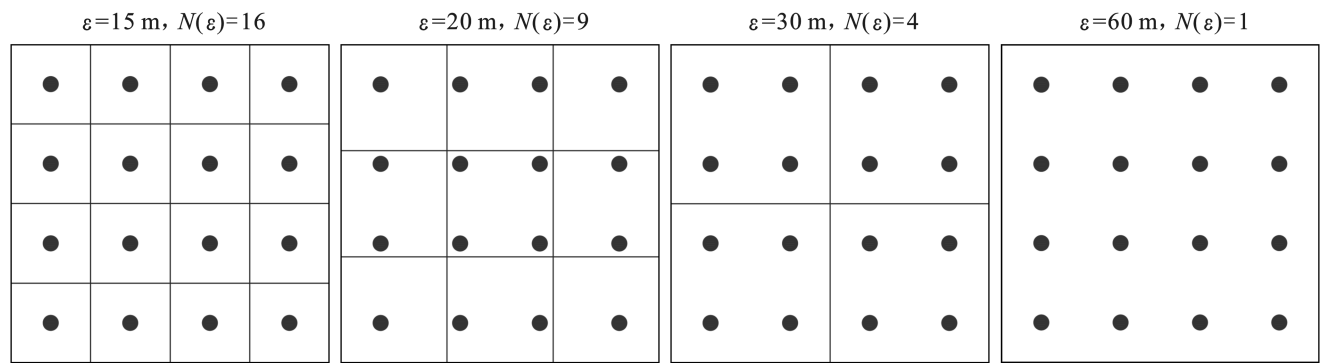


图 2 基于多重分形方法的采样点划分

Fig.2 Sample point division based on multifractal method

2 结果与分析

2.1 地下水影响深度

测定了新造耕地不同空间位置地下水影响深度。如图 3 所示,采样点 1,2,3,4,5,6 的地下水影响深度分别为-0.8,-1.2,-2.0,-3.3,-3.2 和-3.6 m。可以看出地下水影响深度沿着沟头至沟口呈现出逐渐降低趋势。

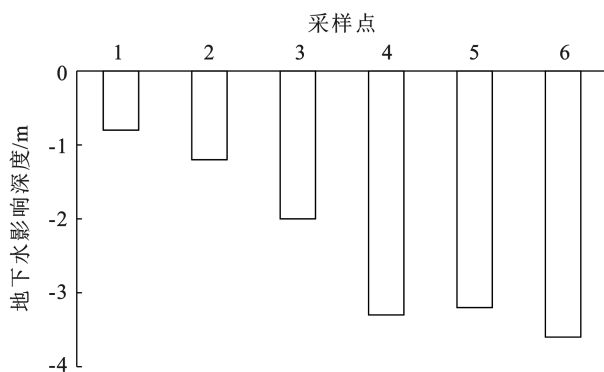


图 3 新造耕地不同空间位置地下水影响深度

Fig.3 Depths of groundwater influence in different locations of newly cultivated farmland

2.2 土壤水、盐含量空间变化

表 2 为治沟新造耕地不同空间位置在 0—20 cm 和 20—40 cm 深度土壤水分和盐分描述性统计。在整个土层,采样点 1,2,3 的平均土壤水分显著高于采样点 4,5,6 ($p < 0.05$),采样点 1,2,3 的平均土壤水分含量为 17.6%,比采样点 4,5,6 的平均土壤水分高 23.0%;同时,所有采样点 20—40 cm 土层平均水分含量比 0—20 cm 高 14%,采样点 1,2,3 的土壤水分在 0—20 cm 与 20—40 cm 土层未表现出显著差异,而采样点 4,5,6 表现出显著差异 ($p < 0.05$)。采样点

1,2,3 的平均土壤盐分含量为 0.81 g/kg,比采样点 4,5,6 的平均土壤盐分高出 14% ($p < 0.05$);所有采样点 0—20 cm 土层平均土壤盐分含量比 20—40 cm 土层高 10% ($p < 0.05$),采样点 2,采样点 3 和采样点 4 土壤盐分在 0—20 cm 与 20—40 cm 土层未表现出显著差异,而在采样点 1,采样点 5 和采样点 6 表现出显著差异 ($p < 0.05$)。

表 2 治沟新造耕地不同空间位置土壤水盐描述统计

Table 2 Descriptive statistics of soil water and salt in different locations of newly cultivated farmland

采样点	土层/cm	土壤水分/ %	土壤盐分/ (g · kg ⁻¹)
采样点 1	0—20	15.8 ± 4.6 ^{Ab}	0.90 ± 0.12 ^{Aa}
	20—40	17.8 ± 4.4 ^{Ab}	0.74 ± 0.08 ^{Bab}
采样点 2	0—20	17.1 ± 3.4 ^{Aa}	0.84 ± 0.11 ^{Aab}
	20—40	18.9 ± 3.4 ^{Aa}	0.77 ± 0.09 ^{Aa}
采样点 3	0—20	16.9 ± 4.1 ^{Aa}	0.81 ± 0.08 ^{Ab}
	20—40	19.0 ± 3.4 ^{Aa}	0.78 ± 0.10 ^{Aa}
采样点 4	0—20	12.6 ± 1.9 ^{Bb}	0.75 ± 0.07 ^{Abc}
	20—40	14.9 ± 1.9 ^{Ab}	0.72 ± 0.07 ^{Ab}
采样点 5	0—20	13.6 ± 2.1 ^{Bb}	0.73 ± 0.06 ^{Ac}
	20—40	15.3 ± 2.3 ^{Ab}	0.67 ± 0.05 ^{Bbc}
采样点 6	0—20	13.2 ± 1.2 ^{Bb}	0.72 ± 0.09 ^{Ac}
	20—40	16.0 ± 2.4 ^{Ab}	0.65 ± 0.06 ^{Bc}

注:差异性分析显著性水平为 $p < 0.05$,不同上标大写字母代表 0—20 cm 和 20—40 cm 深度土壤水分显著差异,不同上标小写字母代表不同采样点在同一层土壤中水分的显著差异。

2.3 土壤水、盐空间分异特征

图 4 为土壤水、盐在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层的多重分形谱函数。如图 5 所示,随着 q 值的增大, D_q 值减小,表明土壤水分和盐分在不同空间位置整个土层均具有多重分形特征^[19]。

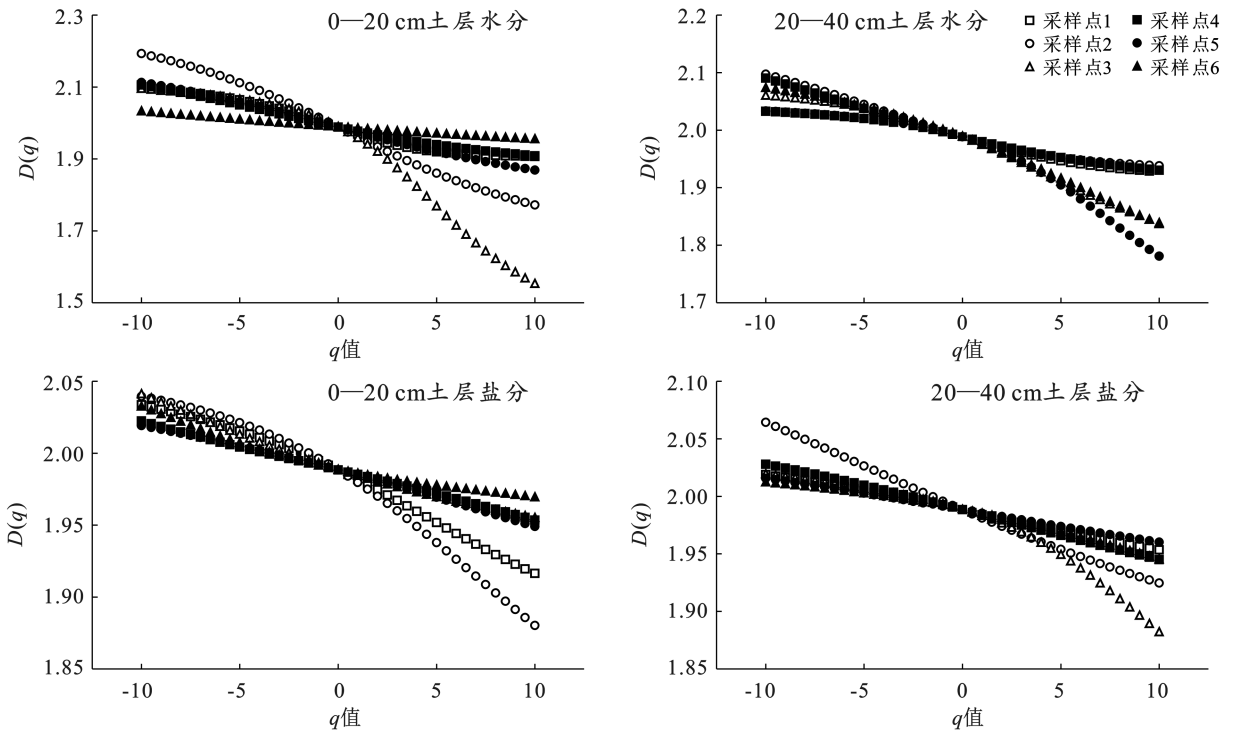


图 4 新造耕地不同空间位置土壤水、盐在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层的多重分形谱函数
 Fig.4 Spectra obtained for generalized dimensions for soil water and salt in 0—20 cm and 20—40 cm soil layers in different locations of newly cultivated farmland

表 3 为新造耕地不同空间位置土壤水分和盐分在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层的多重分形参数。信息熵 D_1 反映了土壤水盐空间分布测度的集中度,它可以表征土壤水分空间分布的不均匀程度, D_1 越小表示土壤水盐空间分布的不均匀程度越高。由表 3 可知,在整个土层,采样点 1,2,3 的土壤水分的平均信息熵 D_1 为 1.970,而采样点 4,5,6 的土壤水分的平均信息熵 D_1 为 1.978,表明采样点 1,2,3 土壤水分空间分布的不均匀程度较高;0—20 cm 和 20—

40 cm 土层水分的平均信息熵 D_1 分别为 1.970 7, 1.977 2,表明 0—20 cm 土层水分空间分布的不均匀程度较高。多重分形参数 ΔD 反映土壤水分局部空间变异性程度, ΔD 越小,变异性越低。在整个土层,采样点 1,2,3 土壤水分的平均多重分形参数 ΔD 比采样点 4,5,6 高 43%,表明采样点 1,2,3 土壤水分局部空间变异性较高;0—20 cm 土层多重分形参数 ΔD 比 20—40 cm 土层高 44%,表明 0—20 cm 土层水分局部空间变异性比 20—40 cm 土层高。

表 3 新造耕地不同空间位置土壤水分在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层的多重分形参数
 Table 3 Multifractal parameters of soil water in 0—20 cm and 20—40 cm soil layers in different locations of newly cultivated farmland

土壤性质	土层深度/cm	多重分形参数	采样点 1	采样点 2	采样点 3	采样点 4	采样点 5	采样点 6
土壤水分	0—20	D_1	1.969 4	1.961 0	1.957 9	1.977 2	1.974 0	1.984 6
		ΔD	0.192 9	0.420 8	0.542 1	0.196 9	0.244 0	0.077 4
	20—40	D_1	1.979 1	1.978 9	1.974 3	1.980 0	1.976 8	1.975 4
		ΔD	0.105 1	0.159 4	0.221 4	0.160 1	0.252 3	0.236 6
土壤盐分	0—20	D_1	1.981 7	1.979 6	1.984 2	1.985 2	1.984 8	1.985 7
		ΔD	0.165 5	0.159 3	0.092 7	0.068 9	0.062 0	0.071 1
	20—40	D_1	1.984 9	1.981 1	1.982 9	1.983 9	1.985 5	1.984 9
		ΔD	0.130 0	0.139 7	0.149 9	0.082 9	0.054 0	0.065 9

在整个土层,采样点 1,2,3 土壤盐分的平均信息熵 D_1 为 1.981 2,而采样点 4,5,6 的平均信息熵 D_1

为 1.984 9,表明采样点 1,2,3 土壤盐分空间分布的不均匀程度较高;0—20 cm 和 20—40 cm 土层盐分

的平均信息熵 D_1 分别为 1.982 9, 1.983 15, 表明 0—20 cm 土层盐分空间分布的不均匀程度较高。多重分形参数 ΔD 反映土壤盐分局部空间变异性程度, ΔD 越小, 变异性越低。在整个土层, 采样点 1, 2, 3 土壤盐分多重分形参数 ΔD 比采样点 4, 5, 6 高 107%, 表明采样点 1, 2, 3 土壤盐分局部空间变异性比采样点 4, 5, 6 高; 0—20 cm 土层盐分多重分形参数

ΔD 与 20—40 cm 土层基本相同, 表明 0—20 cm 与 20—40 cm 土层盐分局部空间变异性基本相同。图 5 为新造耕地不同空间位置平均土壤水、盐含量与地下水影响深度、采样地块面积的相关关系。由图 5 可知, 土壤水、盐含量与地下水影响深度呈现显著的正相关关系, 表明地下水影响深度越浅, 土壤水、盐含量越高。

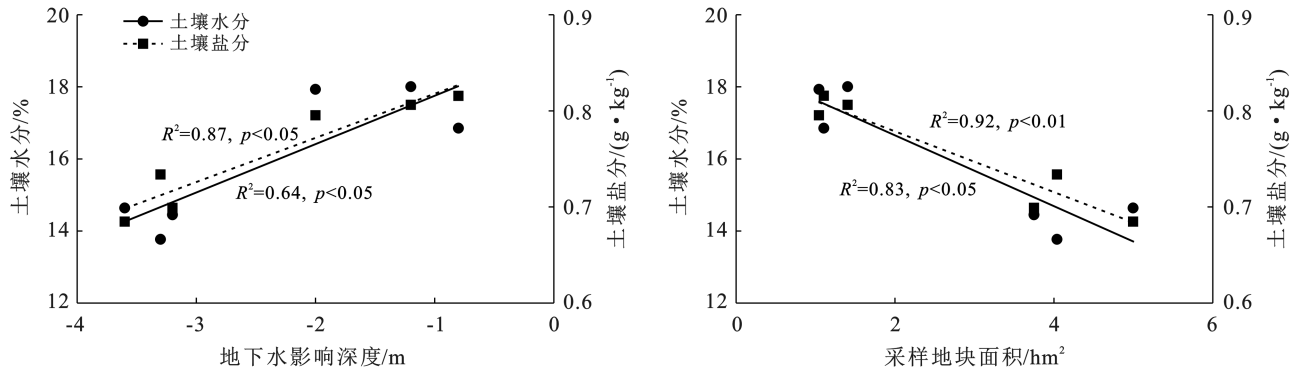


图 5 新造耕地不同空间位置平均土壤水、盐含量与地下水影响深度关系

Fig.5 Relationship between mean content of soil water and salt with depths of groundwater influence zone in different locations of newly cultivated farmland

图 6 为新造耕地不同空间位置土壤水、盐的多重分形参数与地下水影响深度、采样点地块面积的皮尔逊相关性分析。在整个土层, 地下水影响深度与土壤水分的多重分形参数 (D_1 和 ΔD) 没有呈现出显著的相关关系, 而与土壤盐分的多重分形参数 (D_1 和 ΔD) 呈现出显著的相关关系 ($p < 0.05$); 采样地块面积与土壤盐分的多重分形参数 (D_1 和 ΔD) 的相关系数较高, 最小值为 0.75。

3 讨论与结论

沿沟头至沟口, 采样点 1, 2, 3 土壤水分空间变异性高于采样点 4, 5, 6。可能有以下 3 个原因: ①土壤性质的空间变异性影响土壤水分的分布, 采样点 1, 2, 3 地块面积仅仅为采样点 4, 5, 6 地块的 0.28 倍, 在治沟造地过程中, 狭窄的地形使采样点 1, 2, 3 的地块土壤性质空间变异性较高, 进而造成对水分保持能力表现出差异。Zhu 和 Lin^[20] 研究表明, 地形属性对土壤水分有更显著的影响, 其本质是土壤性质的空间变异性导致土壤水分含量的差异, 这支持了我们的结果。②采样点 1, 2, 3 土壤水分含量比采样点 4, 5, 6 高 23.0%。Fang 等^[21] 分析了不同采样时期果园土壤水分空间变异性, 表明当土壤水分含量较高时, 其空间变异性高于较低土壤水分含量, 这与我们的结果相同。③土壤水分空间变异性与地下水影响深度相关性不显著。图 6 为新造耕地不同空间位置土壤水分的多重分形参数与地下水影响深度间相关性分析。在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层, 土壤水分的信息熵 D_1 与地下水影响深度的相关性均未达到显著水平。在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层, 土壤水分的多重分形参数 ΔD 与地下水影响深度的相关性均未达到显著水平。

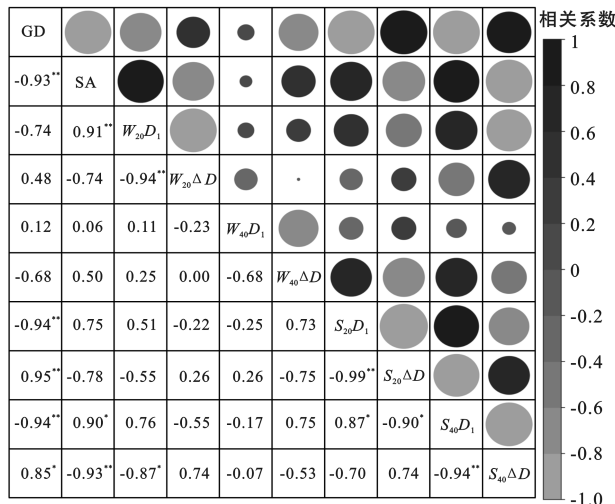


图 6 新造耕地不同空间位置土壤水、盐的多重分形参数与地下水影响深度、采样点地块面积的相关性

Fig.6 Relationship between multifractal parameter of soil water and depths of groundwater influence zone in different locations of newly cultivated farmland

沿沟头至沟口, 采样点 1, 2, 3 土壤盐分空间变异性高于采样点 4, 5, 6。①地下水影响深度是重要的影

响因素,在0—20 cm和20—40 cm土层,新造耕地不同空间位置土壤盐分的信息熵 D_1 与地下水影响深度均呈现显著线性负相关关系($p < 0.01$)(图5),表明地下水影响深度越浅土壤盐分空间不均匀程度越高。同时,新造耕地不同空间位置土壤盐分的多重分形参数 ΔD 与地下水影响深度均呈现显著线性正相关关系($p < 0.01$)(图6),表明地下水影响深度越浅土壤盐分局部空间变异性越高。研究发现地下水影响深度沿着沟头至沟口呈现出逐渐降低趋势,采样点1,2,3,采样点4,5,6的平均地下水影响深度分别为-1.3 m和-3.4 m,因此,采样点1,2,3土壤盐分空间变异性较高。②坡面径流和泥沙侵入采样点1,2,3地块也是该区域土壤盐分空间变异性高的一个重要因素。采样点1,2,3地块的南侧有排水设施,而北侧没有布设排水设施(图1)。在降雨后,北侧坡耕地和边坡发生土壤侵蚀,径流和泥沙通过沟道1,2,3侵入采样点1,2,3地块,径流和泥沙具有高含盐量,其在采样点1,2,3地块不均匀沉积增加了该区域土壤水盐的空间变异性。采样点4,5,6坡面仅有一条沟道4,其产生的径流和泥沙从采样点4与采样点5之间的排水沟排出,采样点4,5,6地块不受坡面径流和泥沙的影响。③土壤性质空间分布的不均匀性是采样点1,2,3地块土壤盐分空间变异性高的一个潜在因素。采样点1,2,3地块面积仅仅为采样点4,5,6地块的0.28倍,在治沟造地过程中,沟道填埋的土壤来自坡面几米至几十米深度土层,黄土的带状分布表明土壤性质在不同土层具有差异,由于采样点1,2,3地块狭窄的地形不利于机械施工,坡面挖掘的土壤被不均匀的填埋在沟道,导致使采样点1,2,3地块土壤性质空间变异高于采样点4,5,6地块,进而造成采样点1,2,3地块土壤水分空间变异性较高。盐分随着土壤水分迁移而迁移,土壤水分空间分布很大程度上决定了盐分的空间分布^[22],因此表现出采样点1,2,3地块土壤盐分空间变异性较高。

综上所述,浅的地下水影响深度是采样点1,2,3地块土壤水、盐含量及其空间变异性高的主要原因。此外地形特征、坡面径流以及泥沙侵入也是其重要的影响因素。总之,靠近沟头位置的新造耕地是土壤盐分活跃区,同时也是未来土壤盐碱化预防的重点区域。

[参 考 文 献]

[1] Du Huadong, Jiao Juying, Kou Meng, et al. Seasonal dynamics and vertical distribution pattern of bud bank in different erosion environments on hilly-gully Loess Plateau of Northwest China [J]. The Journal of Applied

Ecology, 2013,24,1269-1276.

- [2] Wu Lei, Liu Xia, Ma Xiaoyi. Impacts of grain for green project on spatiotemporal variations of soil erosion in a typical watershed of Chinese Loess Hilly and gully region [J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2016,25, 4506-4516.
- [3] Yuan Xuefeng, Han Jichang, Shao Yajing, et al. Geodetection analysis of the driving forces and mechanisms of erosion in the hilly-gully region of Northern Shaanxi Province [J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29,779-790.
- [4] Zhu Lianqi. Study on soil erosion and its effects on agriculture sustainable development in West Henan Province loess hilly areas [J]. Journal of Food Agriculture & Environment, 2013,11:906-908.
- [5] 赵安周,张安兵,刘海新,等.退耕还林(草)工程实施前后黄土高原植被覆盖时空变化分析[J].自然资源学报, 2017,32(3):449-460.
- [6] 胡春宏.黄河水沙变化与治理方略研究[J].水力发电学报,2016,35(10):1-11.
- [7] 任美镠.黄河的输沙量:过去、现在和将来:距今15万年以来的黄河泥沙收支表[J].地球科学进展,2006,21(6):551-563.
- [8] 赵玉,穆兴民,何毅,等.1950—2011年黄河干流水沙关系变化研究[J].泥沙研究,2014(4):32-38.
- [9] 强敏敏.生物炭与氮肥配施对黄土丘陵沟壑区治沟造地新造耕地生产力提升机制[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [10] Chen Yiping, Wu Junhua, Wang Hong, et al. Evaluating the soil quality of newly created farmland in the hilly and gully region on the Loess Plateau, China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2019,29:791-802.
- [11] 高小文.延安治沟造地引起的地下水位变化及其危害防治[D].陕西西安:长安大学,2019.
- [12] Jin Zhao, Guo Li, Wang Yunqiang, et al. Valley reshaping and damming induce water table rise and soil salinization on the Chinese Loess Plateau [J]. Geoderma, 2019,339:115-125.
- [13] Ke Zengming, Liu Xiaoli, Ma Lihui, et al. Rainstorm events increase risk of soil salinization in a loess hilly region of China [J]. Agricultural Water Management, 2021,256:107081.
- [14] Wang Q, Huo Z, Zang L, et al. Impact of saline water irrigation on water use efficiency and soil salt accumulation for spring maize in arid regions of China [J]. Agricultural Water Management, 2016,163:125-138.
- [15] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2005.

- [16] Ke Zengming, Liu Xiaoli, Ma Lihui, et al. Excavated farmland treated with plastic mulching as a strategy for groundwater conservation and the control of soil salinization [J]. *Land Degradation & Development*, 2022, 33(16):3036-3048.
- [17] Evertsz C J G, Mandelbrot B B. *Multifractal measures* [M]. *Chaos & Fractals New Frontiers of Science*, Springer-Verlag, 1992,984.
- [18] Qi Fei, Zhang Ronghua, Liu Xia, et al. Soil particle size distribution characteristics of different land-use types in the Funiu mountainous region [J]. *Soil and Tillage Research*, 2018,184:45-51.
- [19] Vázquez E V, Miranda J G V, Paz-Ferreiro J. A multifractal approach to characterize cumulative rainfall and tillage effects on soil surface micro-topography and to predict depression storage [J]. *Biogeosciences*, 2010, 7:2989-3004.
- [20] Zhu Qing, Lin Henry. Influences of soil, terrain, and crop growth on soil moisture variation from transect to farm scales [J]. *Geoderma*, 2011,163:45-54.
- [21] Fang Kaikai, Li Huike, Wang Zhikang, et al. Comparative analysis on spatial variability of soil moisture under different land use types in orchard [J]. *Scientia Horticulturae*, 2016,207:65-72.
- [22] Fatholouloumi S, Vaezi A R, Firozjaei M K, et al. Quantifying the effect of surface heterogeneity on soil moisture across regions and surface characteristic [J]. *Journal of Hydrology*, 2021,596:126132.

(上接第 71 页)

- [24] 文勇立,孙静,王永,等.若尔盖沙化草地土壤 pH、水、盐空间异质性研究[C].北京:中国畜牧兽医学学会家畜生态分会第七届全国代表大会暨学术研讨会论文集,2008.
- [25] 周启龙.藏西沙化草地根系分布与土壤理化性质的关系[J].*水土保持通报*,2021,41(1):1-5.
- [26] 李世龙.青藏高原东缘玛曲沙化高寒草地土壤理化性质[J].*中国沙漠*,2022,42(6):44-52.
- [27] 雷玮倩,胡玉福,杨泽鹏,等.垦殖对川西北高寒草地土壤中不同磷组分含量的影响[J].*草业学报*,2019,28(5):36-45.
- [28] 魏志标,柏兆海,马林,等.中国天然草地氮磷流动空间特征[J].*中国农业科学*,2018,51(3):523-534.
- [29] 姜丽娜,马洁,刘建康,等.毛乌素沙地不同植被恢复措施下土壤理化性质空间分布特征[J].*水土保持通报*,2022,42(5):1-7.
- [30] 贾莉洁,李玉会,孙本华,等.不同管理方式对土壤无机磷及其组分的影响[J].*土壤通报*,2013,44(3):612-616.
- [31] 邵丹.若尔盖退化沼泽湿地的土壤磷素组分变化特征研究[D].四川 成都:四川农业大学,2017.
- [32] 吴璐璐,柳小琪,张泽兴,等.吉林省典型土壤磷素形态及有效性[J].*西北农业学报*,2021,30(5):737-745.

(上接第 80 页)

- [20] 麻浩,张桦,马林,等.无灌溉管件防护梭梭荒漠造林新技术及其示范推广[J].*中国科学(生命科学)*,2014,44(3):248-256.
- [21] 王泽,梁燕,阿不都克玉木·米吉提,等.防护条件下梭梭幼苗生长及养分吸收特性[J].*干旱区研究*,2017,34(1):112-118.
- [22] 朱琳,晋强,胡荻.石膏基棉秆复合材料防护管件的制备及防护性能研究[J].*新疆农业大学学报*,2018,41(4):292-297.
- [23] 曹辉,冯勇,晋强.石膏基棉花秸秆矿渣复合砌块的试制研究[J].*新型建筑材料*,2013,40(1):55-56,65.
- [24] 龚建清,方萍,吴慧敏.普通硅酸盐水泥对石膏基混合胶结材的改性研究[J].*湖南大学学报(自然科学版)*,1997,24(6):79-84.
- [25] 范严伟,王延祥,朱鹏程,等.竖管地表滴灌下风沙土稳定入渗率与湿润体估算模型[J].*农业工程学报*,2021,37(7):103-111.
- [26] 范严伟,王延祥,史金红,等.竖管地表滴灌与普通地表滴灌土壤水分运移特性对比试验研究[J].*水土保持学报*,2022,36(6):163-170.
- [27] 王建东,龚时宏,许迪,等.地表滴灌条件下水热耦合迁移数值模拟与验证[J].*农业工程学报*,2010,26(12):66-71.
- [28] Helms T C, Deckard E, Goos R J, et al. Soil moisture, temperature, and drying influence on soybean emergence [J]. *Agron*, 1996,88:662-667.