

人为干扰活动对玛纳斯河流域棉田土壤容重的影响

陈图峥^{1,2*}, 李艳红^{1,2#}, 李发东^{1,2,3,4}, 何新林⁵

¹新疆师范大学地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐

²新疆维吾尔自治区重点实验室“新疆干旱区湖泊环境与资源实验室”, 新疆 乌鲁木齐

³中国科学院地理科学与资源研究所, 北京

⁴中国科学院大学资源与环境学院, 北京

⁵石河子大学水利建筑工程学院/现代节水灌溉兵团重点实验室, 新疆 石河子

Email: 1433498045@qq.com, #lyh0704@126.com

收稿日期: 2021年2月26日; 录用日期: 2021年3月22日; 发布日期: 2021年3月30日

摘要

本文将玛纳斯河流域划分为山前绿洲、人工平原绿洲和绿洲与荒漠过渡带三个研究区, 于2019年5、8和10月对绿洲区膜下滴灌棉田土壤容重进行采样, 基于地统计学方法和ArcGis技术对棉田土壤容重进行空间异质性分析。结果表明: 1) 玛纳斯河流域棉田土壤容重的季节变化规律为5月(出苗期) > 10月(吐絮期) > 8月(花铃期), 其棉田土壤容重各季节变异程度均属于中等; 在水平方向上, 各季节的0~60 cm的土壤平均容重均呈现出人工平原绿洲 > 绿洲与荒漠过渡带 > 山前绿洲土壤的分布格局; 在垂直剖面上, 5月和八月土壤容重表现出由浅层至深层增加的趋势, 但10月土壤容重表现出由浅层至深层下降的趋势; 2) 经地统计学分析表明, 人工绿洲土壤容重存在强空间自相关性, 受结构因素影响大, 山前绿洲和绿洲与荒漠过渡带土壤容重空间自相关性较弱, 受随机因素影响大。研究表明土壤质地和有机质含量的空间分布差异是造成玛河流域棉田土壤容重呈现条带状和斑块状分布格局的主要因素, 人为耕种制度和棉花生长导致土壤容重呈现季节变化。

关键词

土壤容重, 膜下滴灌, 玛纳斯河流域, 棉田

Effect of Human Disturbance on Soil Bulk Density of Cotton Field in Manas River Basin

Tuzheng Chen^{1,2*}, Yanhong Li^{1,2#}, Fadong Li^{1,2,3,4}, Xinlin He⁵

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 陈图峥, 李艳红, 李发东, 何新林. 人为干扰活动对玛纳斯河流域棉田土壤容重的影响[J]. 水土保持, 2021, 9(1): 26-39. DOI: 10.12677/ojswc.2021.91004

¹College of Geographic Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi Xinjiang

²Key Laboratory of Xinjiang Uygur Autonomous Region,

Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Area, Urumqi Xinjiang

³Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing

⁴College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing

⁵College of Water and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi Xinjiang

Email: 1433498045@qq.com, #lyh0704@126.com

Received: Feb. 26th, 2021; accepted: Mar. 22nd, 2021; published: Mar. 30th, 2021

Abstract

In this paper, the Manas River basin was divided into three study areas: Piedmont oasis, artificial plain oasis and oasis-desert transition zone. Soil bulk density of cotton field under drip irrigation under plastic film was sampled in May, August and October 2019, and the spatial heterogeneity of soil bulk density of cotton field was analyzed based on geostatistics and Arcgis technology. The results showed that: 1) the seasonal variation of soil bulk density of cotton field in Manas River basin was May (seedling stage) > October (boll opening stage) > August (flower and boll stage), and the seasonal variation of soil bulk density of cotton field was moderate. In the horizontal direction, the average soil bulk density of 0~60 cm in each season showed the distribution pattern of artificial plain oasis > oasis and desert transition zone > Piedmont oasis soil distribution pattern. In the vertical profile, the soil bulk density increased from shallow layer to deep layer in May and August, but decreased from shallow layer to deep layer in October; 2) Geostatistical analysis shows that there is a strong spatial autocorrelation of soil bulk density in artificial oasis, which is greatly affected by structural factors, while the spatial autocorrelation of soil bulk density in Piedmont oasis and oasis-desert transition zone is weak and greatly affected by random factors. The results showed that the spatial distribution differences of soil texture and organic matter content were the main factors leading to the banded and patchy distribution pattern of soil bulk density in cotton fields in Mahe River basin, and the soil bulk density changed seasonally due to artificial farming system and cotton growth.

Keywords

Soil Bulk Density, Drip Irrigation under Plastic Film, Manas River Basin, Cotton Field

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

土壤容重是单位体积干土的质量,反映了土壤的松紧程度,影响作物和产量,是土壤质量和生产力的重要指标。土壤容重是导热率,保水率,水力传导率和蒸汽扩散率等土壤水力特性和热力性质的重要因素[1] [2] [3] [4]。土壤容重也是评估土壤有机碳库的关键因[5] [6]。土壤容重受结构性因素(母质、气候、地形、生物、时间)和随机因素(人类活动)等的差异影响[7] [8] [9],在空间尺度和垂直方向上呈现出空间异质性。学者应用传统的统计学方法,地统计学方法和 GIS 技术对不同尺度和不同区域的土壤容

重空间变异性进行了大量研究[10]-[20], 李晓晓等[21]研究了西北干旱区农田表层土壤容重的空间变异性特征, 发现表层土壤容重变异系数为 0.080, 属于弱变异性, 但在空间上呈现由西向东逐渐减小的南北走向条带状分布格局, 土壤质地和土地利用方式是影响其空间分布的主要因素。王金贵等[22]研究陕西关中地区旱地农田土壤容重空间变异性, 发现土壤容重具有中等变异强度, 以村庄为中心向外逐渐增大; 在垂直方向上容重存在明显的变异性, 主要受人为就近原则进行有机培肥和耕种制度的影响。孙国军等[9]运用传统统计学、GIS 空间技术和地统计学的 Kriging 空间插值等方法研究伊犁河谷表层土壤容重的空间变异特征, 发现土壤容重属于弱变异性, 表层土壤容重南北走向呈条带状, 东西走向呈斑块状分布格局, 气候、母质等自然因素是表层土壤容重变化的内在因素, 土地利用加速土壤容重的变化。曹国栋和陈接华等[23] [24]研究玛纳斯河流域土壤物理性质, 发现随着土层深度增加, 土壤容重呈显著性升高; 土壤平均容重表现为干三角洲 > 扇缘带 > 冲积平原区。玉苏甫·买买提等[25]研究渭干河-库车河三角洲绿洲连作棉田理化性质, 发现随着棉花连作年限的增长棉田土壤容重增大, 棉花长期连作会导致土壤容重增大, 土体紧实板结, 结构性差, 不利于农业生产。万素梅[26]等研究新疆连作年限对棉田土壤物理性质的影响, 发现在棉花生长的中后期, 容重的增加幅度较大。玛纳斯河流域是我国重要的商品棉生产基地, 是中国最早推广实行膜下滴灌的地区, 长期连作棉田是该区域的典型耕种模式。长期连作导致玛河棉田土壤质量有所下降, 贺怀杰等[27]研究石河子 121 团不同连作年限的膜下滴灌棉田的残膜分布情况, 发现随着膜下滴灌年限的增加, 棉田土壤中残膜的数量和密度均呈逐年上升趋势。王海江等[28]研究玛纳斯河流域长期连作棉田土壤重金属分布特征和来源, 发现随着连作年限的增加耕层土壤中重金属含量明显升高, 化学磷肥的长期大量施入, 是棉田土壤重金属含量累积的主要原因。此外, 长期连作膜下滴灌棉田的生态环境问题还包括残膜影响土壤水分渗透、土壤含水量、孔隙度和容重等理化性质, 造成土壤质量下降, 抑制棉花生长发育和降低产量等[29] [30]。已有的研究中, 关于干旱区流域滴灌棉田土壤容重的空间变异性研究较少, 玛纳斯河流域有关棉田土壤的研究主要集中在土壤水分, 盐分, 有机碳, 硝态氮等理化性质和水盐运移规律方面[31]-[37]。本研究采用经典统计学和地统计学研究方法, 分析玛纳斯河流域不同绿洲膜下滴灌棉田的空间变异规律, 为后续研究干旱区农田水盐运移和生态农田建设提供基本参数和依据。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

采样点位布置在玛纳斯河流域的山前绿洲, 人工平原绿洲和绿洲与荒漠过渡带的膜下滴灌棉田(图 1)。山前绿洲, 人工平原绿洲和绿洲与荒漠过渡带在土壤质地、降水和蒸发等自然要素存在差异(表 1)。研究区内海拔 200~600 m, 是典型的温带大陆性干旱半干旱气候。玛河流域在 1950 年代以来大力发展农业, 绿洲在逐渐扩张, 1952 年到 1962 年, 绿洲急剧扩张, 大规模集中开发了石河子、安集海、莫索湾和下野地等灌区, 使原来分散的绿洲基本连接起来; 1962 年到 1976 年, 低山带河流两岸的荒漠草原被开发成新绿洲, 安集海、石河子和下野地三大绿洲之间的荒漠被开发, 各绿洲基本相连[38] [39]。目前玛纳斯河流域已经成为新疆最大的绿洲农耕地和我国第四大灌溉农业区, 以种植棉花为主。1998 年以来实施膜下滴灌技术阶段[40]。膜下滴灌历史已有 20 多年。目前, 玛河灌区棉田每年灌溉大约 7~10 次, 施肥采用以水带肥的方式。玛纳斯河流域土壤类型多样, 共分为 44 个土壤类型, 但具有水平地带性[41]。玛纳斯河流域的棉花的耕作制度是 4 月第一次滴灌, 6 月初第二次滴灌(苗期水), 此后隔十天左右滴灌, 一般持续到 8 月 20 号左右, 一年滴灌约 9~10 次。施肥约 60~70 kg/亩, 在 6, 7 和 8 月里施肥, 7 和 8 月施肥量较 6 月大。

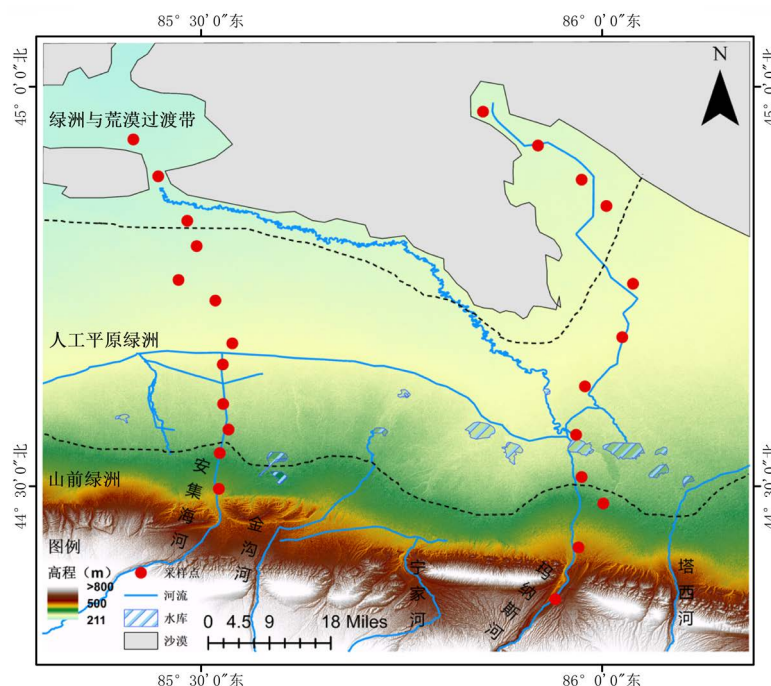


Figure 1. Position in the study area and the sampling point distribution

图 1. 研究区位置及采样点分布图

Table 1. Regional characteristics of cotton field under drip irrigation under plastic film in Manas River

表 1. 玛纳斯河流域区域特征

类型 (Types)	山前绿洲 Piedmont Oasis	人工平原绿洲 Artificial plain oasis	绿洲与荒漠过渡带 Oasis and desert transition zone
海拔(m)	600~400	400~300	300~200
土壤类型	灰漠土	盐化或碱化灰漠土	风沙土
土壤质地	粉质壤土	土质较重	沙土
降雨量(mm)	150~200	110~150	110~120
年平均温度(°C)	5~7	6~7	6.5~8
最热月温度	23~26	24~26	25~28
最冷月温度(°C)	-17~-19	-18~-19.5	-17~-20
蒸发量(mm)	1600~1800	1800~2200	2200~2500

资料来源: 1. 新疆玛纳斯河流域规划平原区水文地质勘察报告(1995); 2. 石河子-沙湾-玛纳斯区域国土资源(1995)。

2.2. 实验方法和数据处理

依据海拔高度和实地观测, 将研究区划分为三个区域, 分别是山前绿洲(400~600 m); 人工平原绿洲(300~400 m)和绿洲与荒漠过渡带(200~300 m)。在室内 GIS 下有针对性的布置样点, 记录各样点坐标, 2019 年在棉花的出苗期(5 月), 花铃期(8 月)和吐絮期(10)进行野外采样依据 GPS 定位尽量与内业预设样点相一致, 并记录实际采样点坐标。在垂直土壤剖面上取 0~5, 5~10, 10~20, 20~40, 40~60 cm 共 5 层土壤。土壤容重采用环刀法测定。使用 Microsoft Excel 2019 和 SPSS 25.0 进行土壤容重的描述性统计分析。利用 GS + 9.0 进行地统计学分析, 地统计学是研究地理现象的空间格局与变异的一种分析方法, 它基于区域化变量理论, 以变异函数为关键性工具, 探讨那些在空间分布上既有随机性又有结构性的现象。它利

用变异函数模型和空间插值方法来表现地理现象的空间过程[42] [43]。采用 ArcGIS 10.7 地统计模块进行土壤容重的空间插值和制图。

3. 结果与讨论

3.1. 土壤容重的基本统计特征

对 5、8、10 月份不同区域土壤容重进行描述性统计分析可知，土壤容重均表现为人工平原绿洲最大。在不同月份土壤平均容重由大到小表现为 5 月 > 10 月 > 8 月(图 2)。8 月各层土壤容重与五月相比下降明显；10 月土壤容重与 8 月相比，0~5、5~10 cm 土壤容重有明显增加，10 cm 以下有所降低；10 月土壤容重与 5 月相比，0~5 cm 土壤容重稍微增加，10 cm 以下土壤容重降低明显(表 2)。在土壤垂直剖面上，5 月和 8 月份不同区域土壤容重均表现出由表层至深层增加的趋势；10 月份不同区域土壤容重均表现出由表层至深层降低的趋势。不同区域土壤容重的变异系数均表现出由浅层至深层增加的趋势。土壤容重变异系数大体在 0.1~0.4 之间，属于中等变异强度。对数据进行 Komlogorow-Smirnow 法进行正态检验(P > 0.05)，发现少部分土壤容重不属于正态分布，要进行数据转换才能进行地统计学分析(表 3)。

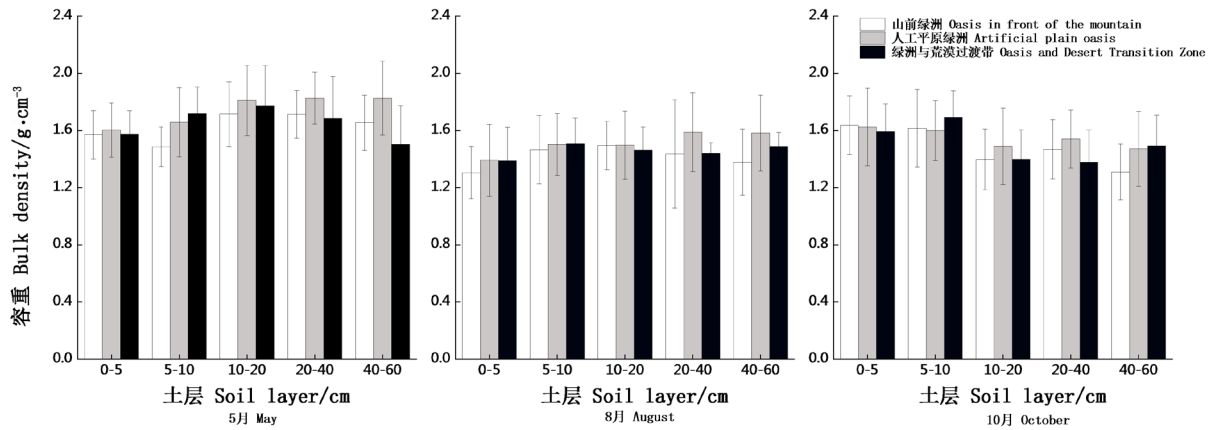


Figure 2. Mean soil bulk density
图 2. 土壤容重均值

Table 2. Changes of soil bulk density in Mahe River Basin in different months
表 2. 玛河流域不同月份土壤容重的变化

区域 Area	土层(cm) Soil layer	8月~5月的增幅(%) The increase in August and May	10月~8月的增幅(%) The increase in October and August	10月~5月的增幅(%) The increase in October and May
山前绿洲	0~5	-16.88	25.35	4.19
	5~10	-1.30	10.23	8.79
	10~20	-12.82	-6.54	-18.52
	20~40	-16.26	2.30	-14.33
	40~60	-16.73	-5.00	-20.90
人工平原绿洲	0~5	-13.20	16.70	1.30
	5~10	-9.37	6.45	-3.53
	10~20	-17.32	-0.48	-17.71
	20~40	-13.05	-3.00	-15.66
	40~60	-13.30	-7.03	-19.40

Continued

绿洲与荒漠过渡带	0~5	-11.73	14.75	1.29
	5~10	-12.27	12.11	-1.65
	10~20	-17.49	-4.42	-21.13
	20~40	-14.50	-4.32	-18.20
	40~60	-0.96	0.30	-0.65

Table 3. Descriptive statistical characteristics of soil bulk density

表 3. 土壤容重描述性统计特征

区域 Area	土层 (cm) Soil layer	最小值 (g/cm ³) Min	最大值 (g/cm ³) Max	标准差 Standard deviation	变异系数(%) Coefficient of variation	k-s	月份(2019年) Month (2019)
山前绿洲	0~5	1.33	1.70	0.17	0.11	0.14	
	5~10	1.40	1.72	0.14	0.09	0.09	
	10~20	1.40	1.96	0.23	0.13	0.96	
	20~40	1.50	1.83	0.17	0.10	0.20	
	40~60	1.38	1.90	0.19	0.12	0.20	
人工平原绿洲	0~5	1.28	1.91	0.19	0.12	0.20	
	5~10	1.34	2.04	0.24	0.15	0.20	
	10~20	1.34	2.18	0.25	0.14	0.14	5
	20~40	1.59	2.14	0.18	0.10	0.13	
	40~60	1.17	2.16	0.26	0.14	0.03	
绿洲与荒漠过渡带	0~5	1.40	1.83	0.17	0.10	0.20	
	5~10	1.46	1.89	0.19	0.11	0.16	
	10~20	1.30	2.07	0.28	0.16	0.20	
	20~40	1.20	2.05	0.29	0.17	0.20	
	40~60	1.12	1.96	0.27	0.18	0.20	
山前绿洲	0~5	1.06	1.55	0.18	0.14	0.20	
	5~10	1.29	1.93	0.24	0.16	0.03	
	10~20	1.28	1.71	0.17	0.11	0.20	
	20~40	0.82	1.83	0.38	0.26	0.20	
	40~60	1.00	1.59	0.23	0.17		
人工平原绿洲	0~5	1.04	1.77	0.25	0.18	0.20	
	5~10	1.22	1.84	0.22	0.14	0.20	
	10~20	1.16	1.90	0.24	0.16	0.20	8
	20~40	1.02	1.99	0.28	0.17	0.20	
	40~60	1.21	2.01	0.26	0.17	0.20	
绿洲与荒漠过渡带	0~5	1.00	1.65	0.23	0.17	0.20	
	5~10	1.18	1.69	0.18	0.12	0.20	
	10~20	1.21	1.70	0.16	0.11	0.20	
	20~40	1.32	1.52	0.07	0.05	0.20	
	40~60	1.35	1.59	0.10	0.07	0.20	

Continued

山前绿洲	0~5	1.30	1.84	0.20	0.13	0.20	
	5~10	1.11	1.88	0.27	0.17	0.20	
	10~20	1.03	1.63	0.21	0.15	0.20	
	20~40	1.11	1.69	0.21	0.14	0.20	
	40~60	1.03	1.58	0.20	0.15	0.20	
人工平原绿洲	0~5	1.17	2.01	0.27	0.17	0.20	10
	5~10	1.34	1.93	0.21	0.13	0.20	
	10~20	1.12	1.98	0.27	0.18	0.20	
	20~40	1.29	1.94	0.20	0.13	0.20	
	40~60	1.07	1.90	0.26	0.18	0.10	
绿洲与荒漠过渡带	0~5	1.37	1.91	0.19	0.12	0.20	
	5~10	1.47	1.96	0.19	0.11	0.20	
	10~20	1.13	1.59	0.20	0.15	0.18	
	20~40	1.08	1.76	0.22	0.16	0.20	
	40~60	1.21	1.83	0.21	0.14	0.20	

3.2. 基于地统计学的土壤容重空间变异特征

利用地统计半方差理论对不同土层土壤容重的空间变异性进行分析, 本研究的空间变异分析采用GS+9.0实现, 采用不同的函数模型对土壤容重进行拟合, 结果见表4, 其中, C_0 为块金值; $C_0 + C_1$ 为基台值; $C_0/(C_0 + C_1)$ 为块金系数, 可以表明土壤性质空间相关性的程度, 一般认为块金系数小于0.25时, 说明空间变量具有强烈的空间自相关性; 若块金系数在0.25~0.75之间时, 变量具有中等程度空间自相关; 若比值大于0.75, 则表示该变量空间相关性弱, 若等于1则变异性较为恒定[38] [39]。5, 8和10月份山前绿洲, 人工平原绿洲和绿洲与荒漠过渡带的基台值均是较小的正值, 说明存在着由采样误差、短距离的变异、随机和固有变异引起的各种正基底效应。不同月份的山前绿洲和绿洲与荒漠过渡带各土层土壤容重的 $C_0/(C_0 + C_1)$ 大部分等于1, 说明其变异性较为恒定; 人工平原绿洲各层土壤容重的 $C_0/(C_0 + C_1)$ 大部分小于0.25, 说明其空间相关性极强, 变异性主要受结构因素影响。变程存在较大差异, 山前绿洲和绿洲与荒漠过渡带的土壤容重变程较为稳定, 山前绿洲的土壤容重空间自相关距大部分为19,323 m。荒漠过渡带的土壤容重变程为32,535m; 人工平原绿洲各层土壤容重空间自相关距存在较大差异, 自相关距变化范围在1160~91,110 m。山前绿洲和绿洲与荒漠过渡带的土壤容重的半方差理论模型大都符合线性模型, 拟合效果较好, 人工平原绿洲各层土壤容重的最佳模型差异较大, 且拟合效果较差。

Table 4. Parameters of theoretical variogram models for soil bulk density

表4. 土壤容重变异半方差特征参数

区域 Area	土层(cm) Soil layer (cm)	块金值 Nugget C_0	基台值 Sill $C_0 + C$	$C_0/C_0 + C$	变程(m) Range	R^2	RSS	模型 Model	月份(2019年) Month (2019)
山前绿洲	0~5	0.003	0.003	1.00	19,323.00	0.685	3.371E-05	线性	5
	5~10	0.004	0.004	1.00	19,323.00	0.596	2.229E-02	线性	
	10~20	0.004	0.004	1.00	19,323.00	0.806	2.166E-05	线性	
	20~40	0.000	0.007	0.00	1510.00	0.080	4.948E-05	球状	
	40~60	0.006	0.006	1.00	19,323.00	0.998	6.440E-05	线性	

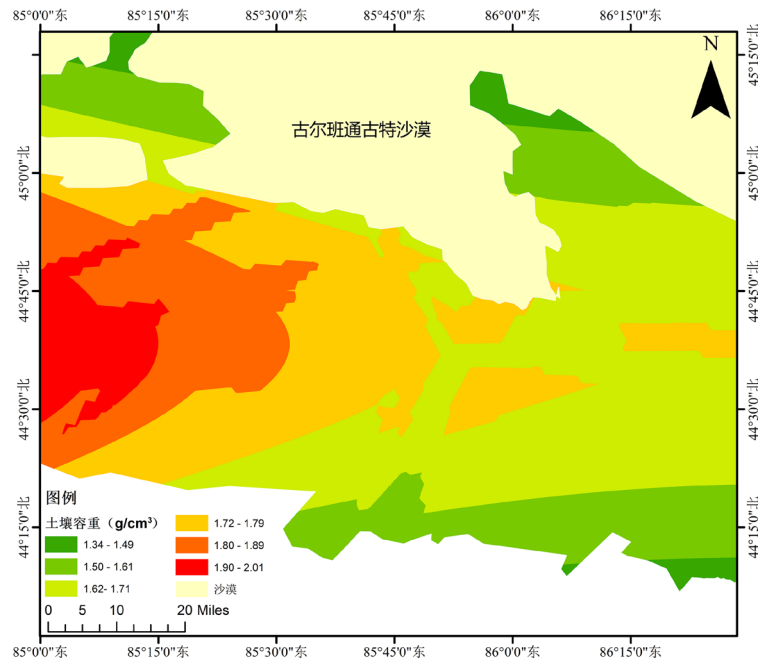
Continued

人工平原 绿洲	0~5	0.004	0.004	1.00	33,724.05	0.356	3.750E-05	线性	8
	5~10	0.003	0.026	0.13	71,100.00	0.156	1.554E-04	指数	
	10~20	0.000	0.004	0.00	7680.00	0.253	1.111E-05	高斯	
	20~40	0.002	0.002	1.00	33,724.05	0.039	6.747E-06	线性	
	40~60	0.000	0.006	0.01	11,080.00	0.005	1.690E-04	球状	
绿洲与荒 漠过渡带	0~5	0.005	0.005	1.00	32,535.03	0.243	1.858E-05	线性	
	5~10	0.000	0.005	0.00	8160.00	0.262	4.791E-05	高斯	
	10~20	0.000	0.009	0.00	7880.00	0.290	1.126E-04	高斯	
	20~40	0.008	0.008	1.00	32,535.03	0.167	3.802E-05	线性	
	40~60	0.005	0.005	1.00	32,535.03	0.860	6.735E-05	线性	
山前绿洲	0~5	0.005	0.005	1.00	19,323.00	0.191	5.107E-06	线性	
	5~10	0.005	0.005	1.00	19,323.00	0.673	1.363E-04	线性	
	10~20	0.003	0.003	1.00	19,323.00	0.913	9.065E-06	线性	
	20~40	0.015	0.015	1.00	19,323.00	0.498	4.394E-04	线性	
	40~60	0.009	0.009	1.00	19,323.00	0.814	1.969E-04	线性	
人工平原 绿洲	0~5	0.007	0.411	0.02	71,100.00	0.185	3.000E-04	指数	10
	5~10	0.000	0.008	0.04	8020.00	0.002	1.019E-05	球状	
	10~20	0.003	0.173	0.02	91,100.00	0.305	6.681E-04	高斯	
	20~40	0.000	0.009	0.00	14,470.00	0.070	1.708E-04	球状	
	40~60	0.003	0.036	0.07	71,100.00	0.297	1.473E-01	指数	
绿洲与荒 漠过渡带	0~5	0.000	0.020	0.00	25,780.00	0.966	5.026E-06	球状	
	5~10	0.005	0.005	1.00	32,535.03	0.253	9.561E-05	线性	
	10~20	0.004	0.004	1.00	32,535.03	0.674	3.219E-05	线性	
	20~40	0.001	0.001	1.00	32,535.03	0.577	4.738E-06	线性	
	40~60	0.001	0.006	0.18	91,100.00	0.192	4.132E-06	指数	
山前绿洲	0~5	0.002	0.020	0.08	57,210.00	0.552	1.424E-06	高斯	
	5~10	0.001	0.001	1.00	19,323.00	0.799	2.665E-06	线性	
	10~20	0.002	0.002	1.00	19,323.00	0.744	1.262E-05	线性	
	20~40	0.005	0.005	1.00	19,323.00	0.906	2.073E-05	线性	
	40~60	0.000	0.006	0.00	6330.00	0.887	4.928E-07	高斯	
人工平原 绿洲	0~5	0.000	0.011	0.00	7290.00	0.195	1.179E-04	高斯	
	5~10	0.000	0.007	0.05	8530.00	0.002	5.086E-05	球状	
	10~20	0.000	0.011	0.00	1160.00	0.000	2.285E-04	指数	
	20~40	0.001	0.008	0.16	13,080.00	0.048	6.190E-05	球状	
	40~60	0.013	0.013	1.00	28,035.97	0.451	1.268E-04	线性	
绿洲与荒 漠过渡带	0~5	0.008	0.008	1.00	32,535.03	0.558	2.651E-04	线性	
	5~10	0.006	0.006	1.00	32,535.03	0.630	8.004E-05	线性	
	10~20	0.000	0.008	0.00	10,090.00	0.129	4.418E-04	球状	
	20~40	0.018	0.018	1.00	32,535.03	0.992	3.181E-04	线性	
	40~60	0.000	0.011	0.00	6920.00	0.364	7.683E-05	高斯	

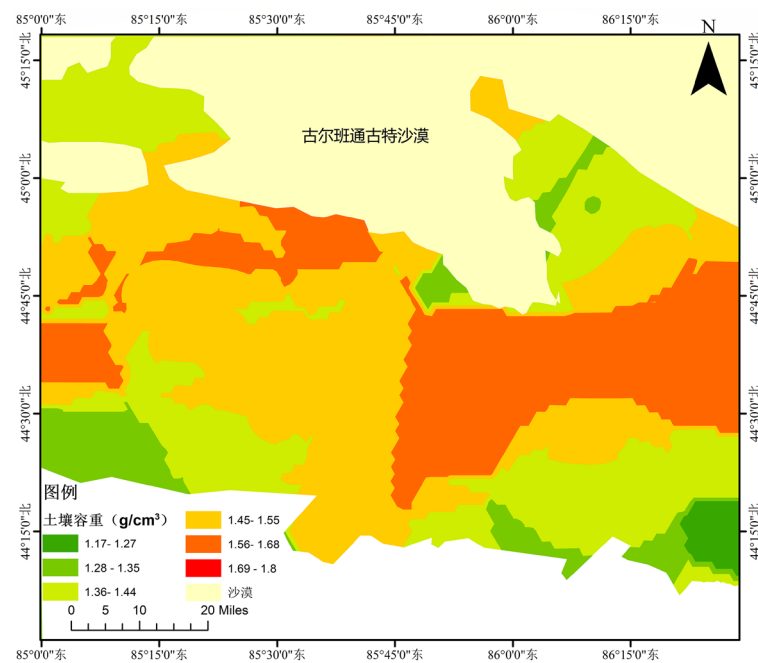
3.3. 土壤容重的空间分布格局

为直观反映玛纳斯河绿洲 - 荒漠滴灌棉田土壤容重的时空变化特征, 基于半方差函数, 通过 Kriging

插值方法将土壤容重绘制成图，共分成 6 级来反映土壤容重的空间分布。由图 3 可以看出，5，8 和 10 月份土壤容重在空间上均呈现出人工平原绿洲较大，绿洲与荒漠过渡带和山前绿洲较小的分布格局。土壤容重较大的主要呈条带状分布于人工平原绿洲地区，从局部来看，部分地区会出现土壤容重偏大或者偏小的值，这可能与人类的扰动有关。通过普通克里金法插值分析，5 月土壤容重最小值为 1.34 g/cm^3 ，最大值为 2.01 g/cm^3 ；8 月土壤容重最小值为 1.17 g/cm^3 ，最大值为 1.83 g/cm^3 ；10 月土壤容重最小值为 1.11 g/cm^3 ，最大值为 1.92 g/cm^3 。5，8 和 10 月份土壤容重始终以 $1.50\sim 1.80 \text{ g/cm}^3$ 范围所占比重最大。



5 月



8 月

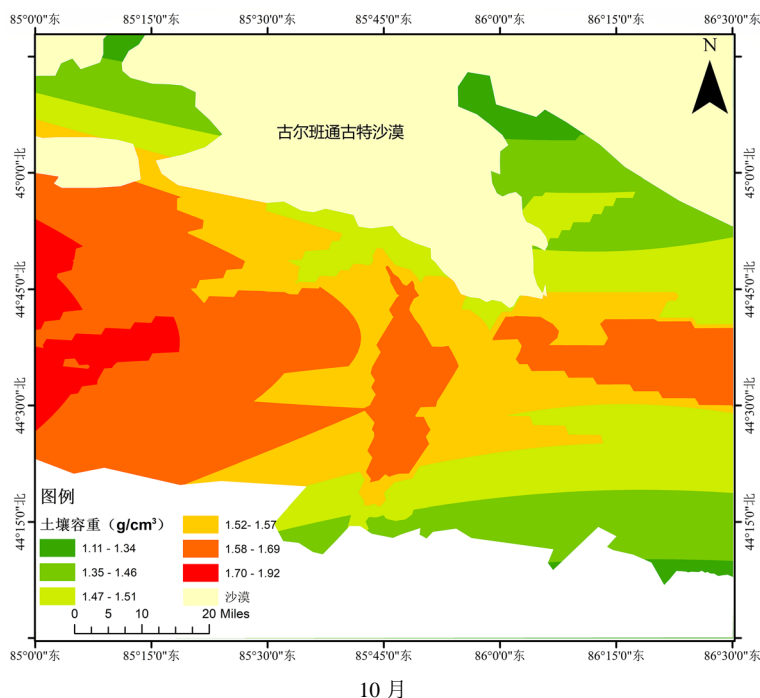


Figure 3. Spatial distribution pattern of soil bulk density
图 3. 土壤容重空间分布格局

3.4. 土壤容重的影响因素

3.4.1. 环境因子的影响

土壤容重受成土母质、气候、生物扰动等综合作用，特别是土壤有机碳含量、黏粒和砂粒体积的影响显著[10]。玛纳斯河流域的山前绿洲，人工平原绿洲和绿洲与荒漠过渡带的土壤分布具有明显的水平地带性，从土壤类型上看，山前绿洲以灰漠土为主，人工平原绿洲以盐化和碱化灰漠土为主，绿洲与荒漠过渡带以风沙土为主；从土壤质地来看，山前绿洲以粉质壤土为主[44]，人工平原绿洲土壤粘粒较高，绿洲与荒漠过渡带土壤粘粒较少。玛河流域棉田土壤有机质含量空间分布不均匀，含量低。由南至北大致呈降低趋势，山前绿洲土壤有机质含量最高，人工平原绿洲最小[45] [46]。土壤有机质与土壤容重存在明显的负相关关系[13] [47]。土壤质地和土壤有机质含量的水平地带性分布导致了土壤容重呈现人工平原绿洲最大，山前绿洲和绿洲与荒漠过渡带偏小的空间分布格局。

3.4.2. 人为活动的干扰

人为活动对棉田土壤容重的影响不可忽视，在灌溉、施肥、耕作等作用下棉田土壤灌耕熟化和潮化，形成灌耕土、潮土等，自然土壤演变为农业土壤。在山前绿洲形成了白板土，人工平原绿洲和绿洲与荒漠过渡带形成了潮土，灌淤土等[48] [49]，在绿洲与荒漠过渡带的沼泽土十分黏重，从 60 年代大面积开展拉沙改黏措施后，从根本上改变了土壤条件[35]。人为活动对年土壤容重的年内变化和垂直分布影响十分显著，8 月土壤容重的陡降是因为随着肥料和水分的施入，有效提高了土壤的有机质和团聚体，加之棉花根系生长增加了水分与空气在土壤中的通道，提高了土壤孔隙度，从而降低土壤容重。到了 10 月份，水肥的滴灌在八月末已经停止，地膜也有所损坏，土壤蒸发增强，表层土壤含水量锐减和有机质被持续消耗导致表层土壤容重增加。在垂直分布上，表层土壤受人为耕种的影响而变得疏松，且变化较深层土壤剧烈。人工平原绿洲的大部分面积是在 1949 年以后大力开发扩展的，开发之前大部分为盐碱土[35]。

人工平原绿洲土壤开垦之后,人为作用强烈,年年耕种,缺乏培肥措施,只用不养,导致土壤中有有机质不断被矿质化,耕层水稳定的团粒结构受到一定程度的破坏,土壤变紧实,致使土壤容重增加变大。

3.5. 讨论

玛纳斯河流域棉田土壤容重整体较大,土壤较为紧实,这是新疆盐碱土的特征。土壤容重受土壤类型,土壤质地,海拔,有机质,土地利用方式等因素的影响(表 5),玛纳斯河流域作为中国第四大灌区,棉田土壤容重主要受土壤质地、土壤有机质含量和人为耕种的影响。

在水平方向上,土壤容重在空间分布上一般呈现出条带状和斑块状格局,在垂直方向上,土壤容重一般随土壤深度增加而增加。在流域尺度上,土壤容重一般呈现出下游 > 中游 > 上游的趋势,这主要受河流沉积时土壤分级以及植被的影响。然而玛纳斯河绿洲-荒漠滴灌棉田土壤容重呈现人工平原绿洲较大,山前绿洲和绿洲与荒漠过渡带较小的特征,这一研究结果与曹国栋等人的研究结果相差较大[24]。这是因为样地选择不同,曹国栋等人的样地选择是原生盐碱土地,本研究的样地均为膜下棉田,棉田的种植对原生土壤的改变作用十分强大[50],人为的耕种活动对玛纳斯河流域的土壤改变显著。玛纳斯河绿洲-荒漠滴灌棉田位于玛纳斯河中下游地区,这部分土壤既受地带性的影响又受非地带性因素的影响,在垂直剖面上,玛河流域棉田土壤容重呈现着土层的深度的增加而增加的趋势,这可能是随着土壤深度的增加,有机质含量减少,团聚体结构较少,根系和土居生物的稀少以及上层土壤的压实密切相关。这与其他研究者的研究结果类似[6] [11]。

Table 5. Study on soil bulk density in different regions of China
表 5. 国内不同地区土壤容重研究

研究区 (Research area)	容重特征 (Bulk density feature)	主要土壤类型 (Soil type)	影响因素 (Influencing factors)	文献 (Literature)
西北干旱区	1.38 g/cm ³ , 呈条带状和斑块状空间分布格局	灌淤土、盐土	土地利用类型	西北干旱区县域农田表层土壤容重空间变异性特征
中国南方喀斯特地区	1.28 g/cm ³	石灰土	有机质、土壤粒度、土壤深度	中国南方喀斯特地区石灰土容重传递函数模型及影响因素研究
鹤庆盆地	1.25 g/cm ³ , 空间格局上表现为东中部高, 南北低	水稻土、石灰、红壤土	土壤类型、质地和土地利用方式	西南岩溶盆地土壤干容重协同克里格分析
藏东南地区	1.337 g/cm ³ , 阳坡高于阴坡、表层低于底层	棕壤、暗棕壤	坡向, 植被	藏东南典型小流域土壤饱和和导水率和土壤容重空间分布
黄河三角洲	1.42 g/cm ³ , 空间分布表现为条带状和斑块状格局	滨海潮盐土	土壤质地、含黏层	黄河三角洲地区土壤容重空间变异性分析
黄土高原	1.31 g/cm ³ , 随土壤深度增加而增加	瘠土, 黄绵土, 风沙土	有机碳含量、土壤粒度、土地利用	黄土高原南北样带不同土层土壤容重变异分析与模拟
朱溪流域	1.24 g/cm ³ , 随海拔和坡度增大而降低	红壤	地形、土地利用	朱溪流域土壤容重空间分异与地形和土地利用的关系
漓江流域	1.2 g/cm ³ , 下游 > 中游 > 上游	红壤、水稻土	土地利用类型	漓江流域表层土壤水物理性质空间异质性
黑河流域	1.46 g/cm ³ , 下游 > 中游 > 上游	栗钙土, 灰漠土	植被, 土壤粒度	黑河流域土壤理化性质分布特征
玛纳斯河流域	1.76 g/cm ³ , 干三角洲 > 扇缘带 > 冲积平原区	灰漠土	土壤粒度	玛纳斯河流域不同地貌和植被类型下土壤物理性质研究

4. 结论

1) 经典统计学分析表明, 研究区土壤容重较大, 土壤较紧实, 不同月份土壤容重变化明显, 平均土壤容重 5 月 > 10 月 > 8 月, 各季节土壤容重均属于中等变异强度。现条带状分布, 人工平原绿洲的土壤容重大于山前绿洲和绿洲与荒漠过渡带, 土壤容重随着土层深度的增加而增加, 土壤容重的变异程度属于中等。

2) 地统计学分析表明, 人工平原绿洲土壤容重具有较强的空间相关性, 受结构性因素影响较大。山前绿洲和绿洲与荒漠过渡带土壤容重空间相关性较弱, 变异性较为恒定。

3) 根据 Kriging 插值可知, 5 月、8 月和 10 月土壤容重均表现为条带状和斑块状格局, 其空间分布格局与研究区土壤质地和土壤有机质含量的分布密切相关。

基金项目

国家自然科学基金联合基金项目(U1803244)。

参考文献

- [1] Kojima, Y., Heitman, J.L., Sakai, M., Kato, C. and Horton, R. (2018) Bulk Density Effects on Soil Hydrologic and Thermal Characteristics: A Numerical Investigation. *Hydrological Processes*, **32**, 2203-2216. <https://doi.org/10.1002/hyp.13152>
- [2] 吕殿青, 邵明安, 潘云. 容重变化与土壤水分特征的依赖关系研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 209-212, 216.
- [3] 付晓莉, 邵明安, 吕殿青. 土壤持水特征测定中质量含水量、吸力和容重三者间定量关系 II. 原状土壤[J]. 土壤学报, 2008, 45(1): 50-55.
- [4] 卢修元, 魏新平, 王君勤. 土壤容重对溶质迁移过程的影响[J]. 水土保持通报, 2013, 33(2): 26-29.
- [5] Sequeira, C.H., Wills, S.A., Seybold, C.A. and West, L.T. (2014) Predicting Soil Bulk Density for Incomplete Databases. *Geoderma*, **213**, 64-73. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.07.013>
- [6] 柴华, 何念鹏. 中国土壤容重特征及其对区域碳储量估算的意义[J]. 生态学报, 2016, 36(13): 3903-3910.
- [7] 连纲, 郭旭东, 傅伯杰, 等. 黄土高原小流域土壤容重及水分空间变异特征[J]. 生态学报, 2006(3): 647-654.
- [8] 孙国军, 李卫红, 朱成刚, 等. 新疆伊犁河谷表层土壤容重的空间变异性分析[J]. 资源科学, 2016, 38(7): 1222-1228.
- [9] 于冬雪, 贾小旭, 黄来明, 等. 黄土区不同土层土壤容重空间变异与模拟[J]. 土壤学报, 2019, 56(1): 55-64.
- [10] 傅子洵, 王云强, 安芷生. 黄土区小流域土壤容重和饱和导水率的时空动态特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(13): 128-134.
- [11] 张梦旭, 刘蔚, 朱猛, 等. 黑河上游山地土壤容重分布特征及影响因素[J]. 山地学报, 2019, 37(2): 198-205.
- [12] 李颖, 刘秀明, 王世杰, 等. 中国南方喀斯特地区石灰土容重传递函数模型及影响因素研究[J]. 地球环境学报, 2018, 9(3): 245-256.
- [13] 徐翠兰, 侯淑楠, 姚紫东, 等. 南方农田土壤容重空间变异性及其尺度效应[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(5): 424-429.
- [14] 姚荣江, 杨劲松, 刘广明. 黄河三角洲地区土壤容重空间变异性分析[J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(4): 11-15.
- [15] 杨玉海, 陈亚宁, 李卫红, 等. 干旱区新垦绿洲人工防护林土壤物理特性及其生态意义[J]. 中国沙漠, 2010, 30(5): 1120-1127.
- [16] 王蕙, 赵文智. 绿洲化过程中绿洲土壤物理性质变化研究[J]. 中国沙漠, 2009, 29(6): 1109-1115.
- [17] 潘宗涛, 陈志强, 陈志彪. 朱溪流域土壤容重空间分异与地形和土地利用的关系[J]. 水土保持通报, 2018, 38(3): 2, 263-268.
- [18] 张湘潭, 曾辰, 张凡, 等. 藏东南典型小流域土壤饱和导水率和土壤容重空间分布[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1): 69-72.
- [19] 李晓晓, 刘京, 赵世伟, 等. 西北干旱区县域农田表层土壤容重空间变异性特征[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 148-151.

- [20] 王金贵, 王益权, 徐海, 等. 农田土壤紧实度和容重空间变异性研究[J]. 土壤通报, 2012, 43(3): 594-598.
- [21] 曹国栋, 陈接华, 夏军, 等. 玛纳斯河流域扇缘带不同植被类型下土壤物理性质[J]. 生态学报, 2013, 33(1): 195-204.
- [22] 陈接华, 王绍明, 曹国栋, 等. 玛纳斯河流域不同地貌和植被类型下土壤物理性质研究[J]. 新疆农业科学, 2012, 49(2): 354-361.
- [23] 玉苏甫·买买提, 满苏尔·沙比提, 阿曼古丽·艾孜子. 棉花连作对渭干河-库车河三角洲绿洲土壤理化性质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(4): 117-121.
- [24] 万素梅, 杲先民, 刘晓红, 等. 长期连作对南疆棉田土壤物理性质影响的研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(12): 48-53.
- [25] 贺怀杰, 王振华, 郑旭荣, 等. 典型绿洲区长期膜下滴灌棉田残膜分布现状研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(2): 63-69.
- [26] 王海江, 董天宇, 朱永琪, 等. 玛纳斯河流域长期连作棉田土壤重金属剖面分布特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(11): 2216-2225.
- [27] 张蚌蚌, 王数, 石建初, 等. 新疆盐碱地膜下滴灌棉田可持续利用系统分析[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(11): 36-48.
- [28] 马建辉, 叶旭红, 韩冰, 等. 膜下滴灌不同灌水控制下限对设施土壤团聚体分布特征的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(18): 3561-3571.
- [29] 柳红东, 张凤华, 李玉义, 崔志霞. 新疆玛纳斯河流域棉田土壤有机碳含量时空分异规律[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(10): 156-160.
- [30] 张伟, 吕新, 王家平, 等. 膜下滴灌棉田水盐运移规律研究[J]. 中国棉花, 2010, 37(1): 12-14.
- [31] 沈浩, 吉力力·阿不都外力. 玛纳斯河流域农田土壤水盐空间分布特征及影响因素[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 769-776.
- [32] 张芸芸, 张利, 董高权, 等. 玛纳斯河流域绿洲内部盐渍化土壤年际动态变化[J]. 中国农学通报, 2020, 36(19): 93-103.
- [33] 阿依古丽·买买提, 吉力力·阿不都外力, 葛拥晓. 玛纳斯河流域绿洲土壤养分空间变异特征与格局[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(9): 153-159.
- [34] 胡越, 陆宝宏, 熊丝, 等. 新疆干旱区膜下滴灌土壤水平衡模拟[J]. 节水灌溉, 2017(3): 25-30.
- [35] 封玲. 玛纳斯河流域农业开发与生态环境变迁研究[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [36] 程维明, 周成虎, 刘海江, 等. 玛纳斯河流域 50 年绿洲扩张及生态环境演变研究[J]. 中国科学:地球科学, 2005(11): 1074-1086.
- [37] 李玉义, 柳红东, 张凤华, 等. 新疆玛纳斯河流域灌溉技术对土壤盐渍化的影响[J]. 中国农业大学学报, 2007, 12(1): 22-26.
- [38] 禹朴家, 徐海量, 乔木, 等. 玛纳斯河流域土壤类型空间分布格局分析[J]. 土壤学报, 2010, 47(6): 1050-1059.
- [39] 方丽章, 李艳红, 李发东, 等. 艾比湖湿地土壤水分-盐分-养分空间异质性分析[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(1): 157-167.
- [40] 奚秀梅. 新疆玛纳斯河中游地区土壤水与土壤水库研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 陕西师范大学, 2014.
- [41] 柳红东. 玛纳斯河流域棉田土壤有机碳含量时空变化的分析[D]: [硕士学位论文]. 石河子: 石河子大学, 2007.
- [42] 张海霞, 牛叔文, 齐敬辉, 等. 基于乡镇尺度的河南省人口分布的地统计学分析[J]. 地理研究, 2016, 35(2): 325-336.
- [43] 孙英君, 王劲峰, 柏廷臣. 地统计学方法进展研究[J]. 地球科学进展, 2004, 19(2): 268-274.
- [44] Abuduwaili, J., Tang, Y., Abulimiti, M., Liu, D.W. and Ma, L. (2012) Spatial Distribution of Soil Moisture, Salinity and Organic Matter in Manas River Watershed, Xinjiang, China. *Journal of Arid Land*, 4, 441-449. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1227.2012.00441>
- [45] 郑存德, 程岩, 张明明. 质地对土壤物理性质的影响及调节研究[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(4): 174-178.
- [46] 张丽. 玛纳斯河流域绿洲荒漠区盐渍化土地利用变化与利用潜力研究[D]: [博士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2013.
- [47] 张青青, 徐海量, 樊自立, 等. 北疆玛纳斯河流域人工绿洲演变过程及其特点[J]. 冰川冻土, 2012, 34(1): 72-80.
- [48] 王月健, 李义玲, 乔木. 玛纳斯河流域耕地时空变化及其生态环境效应[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(11):

53-58.

- [49] 李玉义, 张凤华, 潘旭东, 等. 新疆玛纳斯河流域不同地貌类型土壤盐分累积变化[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 60-64.
- [50] 柴仲平, 梁智, 王雪梅, 贾宏涛. 连作对棉田土壤物理性质的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(8): 192-195.