



# 农业资源与环境学报

CSCD核心期刊  
中文核心期刊  
中国科技核心期刊

## JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

玛纳斯河流域不同绿洲生态系统棉田土壤水分-盐分-养分空间变异特征

陈图峥, 李艳红, 李发东, 何新林

引用本文:

陈图峥, 李艳红, 李发东, 何新林. 玛纳斯河流域不同绿洲生态系统棉田土壤水分-盐分-养分空间变异特征[J]. *农业资源与环境学报*, 2022, 39(6): 1133–1144.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0591>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

[玛纳斯河流域土壤水稳定同位素特征及运移机制](#)

李雅琴, 李发东, 张秋英, 乔云峰, 李俊峰, 田超, KHASANOV Sayidjakhon, 李艳红, 何新林

*农业资源与环境学报*. 2022, 39(4): 690–697 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0351>

[新疆绿洲长期连作棉田土壤氮储量及其垂直分布特征](#)

景峰, 郭成藏, 谈建鑫, 康亚龙, 曹晶晶, 田宝庚, 刘建国

*农业资源与环境学报*. 2015(6): 545–551 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0143>

[油菜绿肥翻压还田对新疆盐碱土壤的改良效果研究](#)

刘慧, 李子玉, 白志贵, 刘建国

*农业资源与环境学报*. 2020, 37(6): 914–923 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0566>

[玛纳斯河流域土壤盐渍化影响因素研究](#)

郑琦, 王海江, 李万涛, 余露, 邵奇

*农业资源与环境学报*. 2016, 33(3): 214–220 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0263>

[施用生物质炭5年后夏玉米土壤呼吸研究](#)

马雯琪, 蒋靖伯伦, 李典鹏, 唐光木, 徐万里, 贾宏涛

*农业资源与环境学报*. 2021, 38(1): 111–118 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0044>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

陈图峰, 李艳红, 李发东, 等. 玛纳斯河流域不同绿洲生态系统棉田土壤水分-盐分-养分空间变异特征[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(6): 1133–1144.

CHEN T Z, LI Y H, LI F D, et al. Spatial variability of soil moisture, salinity, and nutrients in cotton fields of different oasis ecosystems in the Manas River basin[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(6): 1133–1144.



开放科学 OSID

## 玛纳斯河流域不同绿洲生态系统棉田 土壤水分-盐分-养分空间变异特征

陈图峰<sup>1,2</sup>, 李艳红<sup>1,2\*</sup>, 李发东<sup>1,2,3,4</sup>, 何新林<sup>5</sup>

(1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054; 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”, 乌鲁木齐 830054; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 4. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100190; 5. 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832000)

**摘要:**为探讨干旱区山盆体系下不同绿洲生态系统农田的土壤水盐与养分的季节变化和空间变异规律,于2019年5、8、10月在玛纳斯河流域山前绿洲、人工平原绿洲和绿洲与荒漠过渡带采集膜下滴灌棉田土壤,对土壤水分、盐分、铵态氮和硝态氮进行分析。结果表明:不同区域的棉田土壤水盐与养分具有季节性变化特征,变异强度属于中等或强变异;各区域的土壤水分和盐分在垂直剖面上呈现随土层加深而增加的趋势,土壤铵态氮和硝态氮在各土层无明显规律性。不同区域的土壤性质差异较大,土壤含水量表现为绿洲与荒漠过渡带(12.89%)>人工平原绿洲(12.80%)>山前绿洲(12.55%),土壤盐分表现为人工平原绿洲(3.44 g·kg<sup>-1</sup>)>绿洲与荒漠过渡带(2.69 g·kg<sup>-1</sup>)>山前绿洲(1.93 g·kg<sup>-1</sup>),人工平原绿洲和山前绿洲土壤盐分存在显著差异,人工平原绿洲土壤属于轻度盐渍化。土壤铵态氮表现为绿洲与荒漠过渡带(3.77 mg·kg<sup>-1</sup>)>人工平原绿洲(3.53 mg·kg<sup>-1</sup>)>山前绿洲(3.46 mg·kg<sup>-1</sup>),土壤硝态氮表现为山前绿洲(2.02 mg·kg<sup>-1</sup>)>人工平原绿洲(1.90 mg·kg<sup>-1</sup>)>绿洲与荒漠过渡带(0.77 mg·kg<sup>-1</sup>)。半方差函数分析结果表明,山前绿洲、人工平原绿洲和绿洲与荒漠过渡带的棉田土壤水盐与养分的块金值小于0.25或等于1,表明不同区域的土壤性质空间自相关性强,但受采样和农业耕种的影响,存在恒定的变异。山前绿洲和绿洲与荒漠过渡带的土壤盐分、铵态氮和硝态氮的理论模型拟合度较高,人工平原绿洲土壤水盐与养分拟合效果欠佳。研究表明,山前绿洲、人工平原绿洲和绿洲与荒漠过渡带土壤水盐与养分变异的主导因素是土壤类型、气候和地下水位,滴灌和施肥是影响土壤水盐与养分分布的重要人为因素。

**关键词:**玛纳斯河流域;绿洲生态系统;盐分;养分;空间异质性

中图分类号:S156.41

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2022)06-1133-12

doi: 10.13254/j.jare.2021.0591

## Spatial variability of soil moisture, salinity, and nutrients in cotton fields of different oasis ecosystems in the Manas River basin

CHEN Tuzheng<sup>1,2</sup>, LI Yanhong<sup>1,2\*</sup>, LI Fadong<sup>1,2,3,4</sup>, HE Xinlin<sup>5</sup>

(1. College of Geographic Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 2. Key Laboratory of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Area, Urumqi 830054, China; 3. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 5. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China)

**Abstract:** To explore the seasonal and spatial variation of soil water, salt, and nutrients in farmland of different oasis ecosystems in a

收稿日期:2021-09-05 录用日期:2021-12-29

作者简介:陈图峰(1996—),男,广东湛江人,硕士研究生,主要从事干旱区资源开发与规划研究。E-mail:1433498045@qq.com

\*通信作者:李艳红 E-mail:lyh0704@126.com

基金项目:国家自然科学基金重点项目-新疆联合基金重点项目(U1803244)

Project supported: The Key Program of National Natural Science Foundation of China-Xinjiang Joint Fund Project(U1803244)

mountain basin system in arid areas, the soil water, salt, ammonium nitrogen, and nitrate nitrogen contents of cotton fields under film drip irrigation in the piedmont oasis, artificial plain oasis, and oasis and desert transition zone of the Manas River basin in May, August, and October 2019 were analyzed. The results showed that the soil water, salt, and nutrient contents in different regions had seasonal variation, and the variation intensity was medium or strong. The soil moisture and salinity in each region showed an increasing trend with the deepening of the soil layer in the vertical section. However, there was no clear trend of soil ammonium nitrogen and nitrate nitrogen in each soil layer. There were great differences in the soil properties in different regions. The soil water content was in the order of oasis and desert transition zone (12.89%)>artificial plain oasis (12.80%)>piedmont oasis (12.55%). The soil salt content was in the order of artificial plain oasis ( $3.44 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )>oasis and desert transition zone ( $2.69 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) > piedmont oasis ( $1.93 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). There were significant differences in the soil salt content between the artificial plain oasis and piedmont oasis. The soil of the artificial plain oasis showed mild salinization. The soil ammonium nitrogen content was in the order of oasis and desert transition zone ( $3.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) > artificial plain oasis ( $3.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) > piedmont oasis ( $3.46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), and the soil nitrate nitrogen content was in the order of piedmont oasis ( $2.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) > artificial plain oasis ( $1.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) > oasis and desert transition zone ( $0.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). The semi-variance function analysis showed that the nugget value of soil water, salt, and nutrients in the piedmont oasis, artificial plain oasis, and oasis desert transition zone was less than 0.25 or equal to 1, thereby indicating that the spatial autocorrelation of soil properties in different regions was strong, but there was constant variation under the influence of sampling and artificial agricultural cultivation. The theoretical models of soil salt, ammonium nitrogen, and nitrate nitrogen in the piedmont oasis and oasis desert transition zone fit well, whereas the fitting effect of soil water, salt, and nutrients in the artificial plain oasis was not good. The dominant factors of soil water, salt, and nutrient variation in the piedmont oasis, artificial plain oasis, and oasis desert transition zone are soil type, climate, and groundwater level. Drip irrigation and fertilization in cotton fields are the most important human factors that affect the soil water, salt, and nutrient contents.

**Keywords:** Manas River basin; oasis ecosystem; salinity; nutrients; spatial heterogeneity

土壤的空间变异性是地质、地形、气候和土地利用等因素间综合作用的结果<sup>[1]</sup>,并随着时间的推移而发生变化。干旱区典型的山盆体系造成干旱区气候与水文以及土壤等的梯度分布,决定了天然绿洲的规模及范围,影响了人工绿洲的发展潜力<sup>[2]</sup>。受河流与地形地貌以及人类农业活动等的影响,绿洲农田生态系统表现出显著的土壤物理和化学性质的空间变异性。目前,学者广泛运用统计学、地统计学和地理信息系统相结合的方法研究农田土壤性质的空间变异性以及影响因素。关于干旱区土壤空间变异的研究主要集中在河流中下游的绿洲农田,如国外学者在摩洛哥的乌梅拉比河灌溉农田<sup>[3]</sup>、伊朗中部河流下游的绿洲农田<sup>[4]</sup>、约旦河下游的农田<sup>[5]</sup>和蒙古阿尔泰山河绿洲农田<sup>[6]</sup>发现土壤颗粒、pH、盐分和土壤有机质等性质受内在因素和外在因素的影响,变异强度属于中等或强变异。国内学者针对干旱区的黑河中下游绿洲农田<sup>[7]</sup>、三工河流域中上游绿洲农田<sup>[8]</sup>、塔里木河中下游绿洲农田<sup>[9]</sup>、艾比湖流域<sup>[10]</sup>和玛纳斯河流域中下游农田<sup>[11]</sup>的土壤水盐、养分以及其他理化性质的空间变异性进行研究,认为越靠近荒漠土壤盐分含量越高,土壤理化性质的空间变异性与结构性因素与人为干扰活动有关。目前玛纳斯河流域的土壤空间变异研究多集中在绿洲内部、不同土壤质地、农田重金属

和土壤水盐等方面<sup>[12-14]</sup>。如沈浩等<sup>[15]</sup>和阿依古丽·买买提等<sup>[16]</sup>分析了5月的玛纳斯河流域中下游东部的农田土壤含水量和有机质,发现南部的山前平原土壤含水量和有机质均高于北部的荒漠过渡带;WANG等<sup>[17]</sup>研究发现4月的玛纳斯河流域上中下游的表层土壤全盐量呈现增加的趋势;李玉义等<sup>[18]</sup>和陈接华等<sup>[19]</sup>研究玛纳斯河流域冲积洪积扇、冲积平原和干三角洲3种主要地貌类型的土壤空间变异,发现土壤盐分在冲积洪积扇含量最低,土壤水分和有机质呈现冲积洪积扇>冲积平原>干三角洲的分布趋势。一般认为,玛纳斯河流域农田的物理化学性质由南向北存在空间变异性,这是山盆体系、人为耕种、地下水利用等因素共同影响的结果。膜下滴灌尽管在很大程度上提高了水分和养分的利用效率,但在长期、大面积使用后该水肥一体技术带来的盐分和硝态氮累积效应有待深入研究,且集约化种植区可能因施用大量氮肥导致硝态氮污染更为严重<sup>[20]</sup>。关于玛纳斯河流域山前绿洲、人工平原绿洲和绿洲与荒漠过渡带尺度上的农田土壤水盐、铵态氮和硝态氮的空间变异特征以及土壤性质季节变化尚未清晰。本研究以玛纳斯河流域山前绿洲、人工绿洲、绿洲与荒漠过渡带为研究对象,利用地统计学的半变异函数分析不同生态系统土壤水分-盐分-养分时间变化特征和空间分布格局,

有助于土地的合理利用和农田的可持续发展。

## 1 研究区概况与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于玛纳斯河流域,属典型的温带大陆性干旱半干旱气候。依据海拔和实地调查情况,将玛纳斯河流域由南向北划分为山前绿洲(400~600 m)、人工平原绿洲(300~400 m)和绿洲与荒漠过渡带(200~300 m)三个区域,山前绿洲主要在玛纳斯河流域南部,靠近天山山麓,人工平原绿洲主要在135团10连—149团一线以南、142团—玛纳斯电厂一线以北区间,绿洲与荒漠过渡带主要在玛纳斯河流域北部,靠近古尔班通古特沙漠(图1)。山前绿洲、人工平原绿洲和绿洲与荒漠过渡带的土壤、降水量、蒸发量等自然因子存在差异<sup>[21]</sup>(表1)。玛纳斯河流域作为新疆最大的绿洲农耕区和我国第四大灌溉农业区,也是荒漠-绿洲交错带的生态敏感区,山前绿洲开发利用时间较为悠久,人工平原绿洲和绿洲与荒漠过渡带主要在20世纪50年代以后大力开发。玛纳斯河流域自20世纪50年代开始植棉,为新疆北疆主要植棉区,棉花种植面积占灌区耕地面积85%~90%,实行膜下滴灌制度已有20多年,长年连作现象普遍<sup>[14]</sup>。

表1 玛纳斯河流域不同绿洲生态系统特征

Table 1 Characteristics of oasis ecosystems in Manas River

项目 Item	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	400~600	300~400	200~300
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/°C	23~26	24~26	25~28
最冷月温度/°C	-17~-19	-18~-19.5	-17~-20
蒸发量/mm	1 600~1 800	1 800~2 200	2 200~2 500

灌制度已有20多年,长年连作现象普遍<sup>[14]</sup>。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 样品采集与测定

于2019年5、8、10月在玛纳斯河流域山前绿洲、人工平原绿洲和绿洲与荒漠过渡带的膜下滴灌棉田进行采样和调查,土壤采样深度为0~5、5~10、10~20、20~40、40~60 cm,共5层。每次采样点均为24个,分别为山前平原6个,人工平原12个,绿洲与荒漠过渡带6个,每个采样点3次重复采样,共采集样品1 080

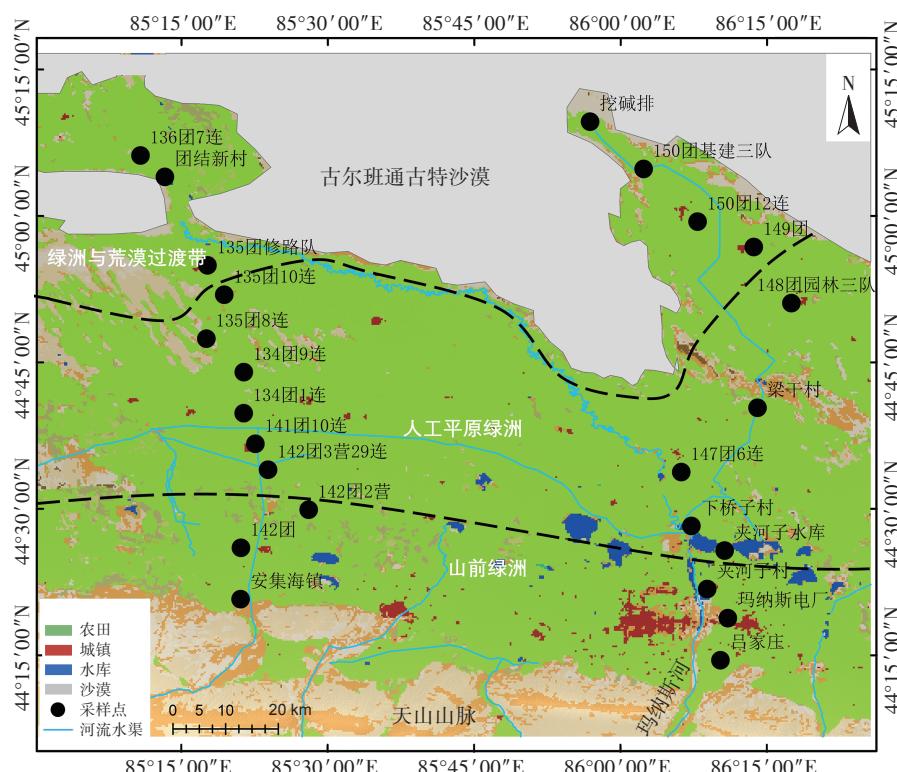


图1 研究区位置及采样点分布

Figure 1 Location of the study area and the sampling point distribution

个。采集的土样迅速寄往中国科学院禹城综合试验站,鲜土用 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氯化钾浸提,土水比 $1:5$ 。土壤硝态氮采用双波长紫外比色法测定,土壤铵态氮采用靛酚蓝比色法测定,土壤水分采用烘干法测量,土壤盐分使用电导法测定。

### 1.2.2 数据处理

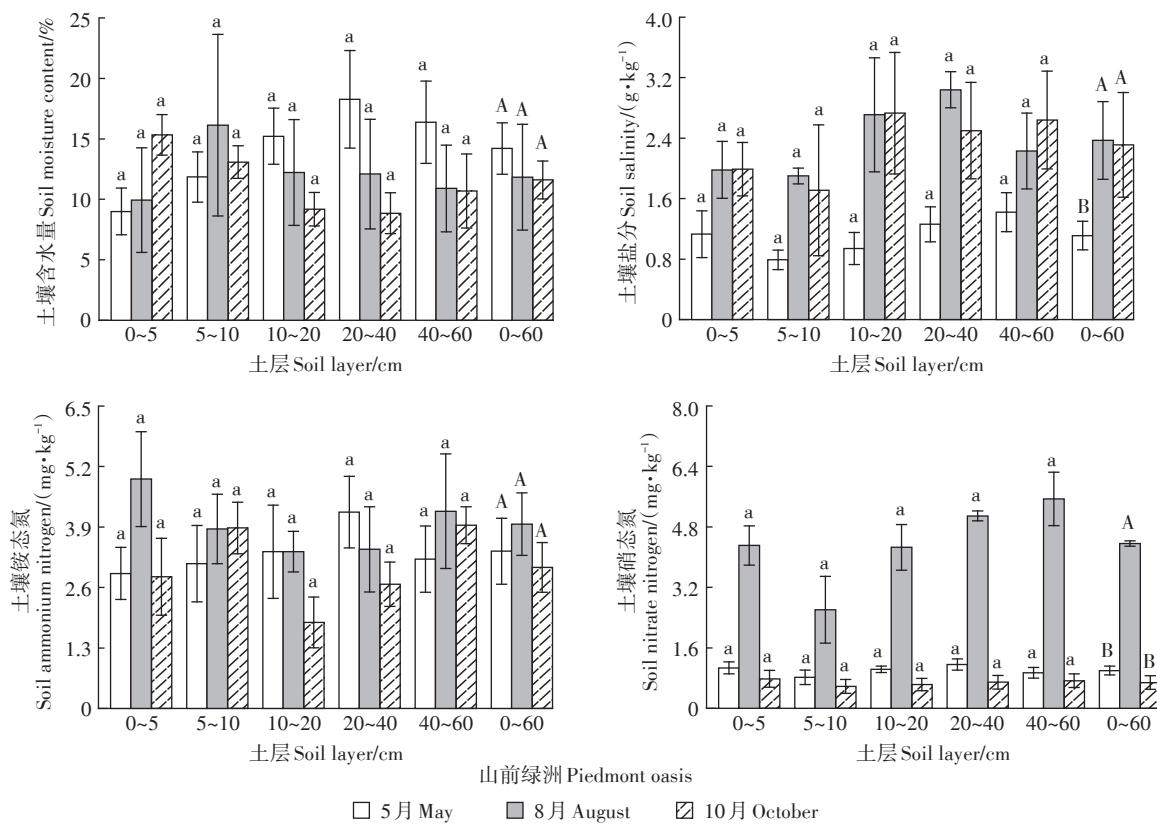
本研究中的描述统计分析在Excel中完成,由于样本量较小且大多为非正态分布,在SPSS 25使用非参数检验对显著性进行分析,空间变异采用GS+for Window软件进行半方差函数分析,使用Arcmap 10.2绘制玛纳斯河流域土壤水分-盐分-养分的分布图。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤水分-盐分-养分的季节变化特征

对不同区域的土壤含水量、盐分、铵态氮和硝态氮进行描述性统计分析,玛纳斯河流域棉田土壤的水分、盐分、铵态氮和硝态氮存在明显的季节变化(图2)。在山前绿洲和绿洲与荒漠过渡带,土壤含水量从5、8月到10月总体呈现逐渐下降的趋势,人工平原绿

洲的土壤含水量则呈现5月>10月>8月。在山前绿洲和绿洲与荒漠过渡带,土壤盐分呈现8月>10月>5月,人工平原绿洲呈现5月>10月>8月。土壤铵态氮含量在山前绿洲和绿洲与荒漠过渡带表现为8月>5月>10月,人工平原绿洲表现为10月>8月>5月。土壤硝态氮含量在山前绿洲土壤表现为8月>5月>10月,人工平原绿洲为8月>10月>5月,绿洲与荒漠过渡带为10月>5月>8月。使用非参数检验分析发现,不同区域的土壤性质在季节间差异不显著。在垂直剖面上,山前绿洲、人工平原绿洲和绿洲与荒漠过渡带土壤含水量和盐分总体上呈现出由表层至深层逐渐增加的趋势,土壤铵态氮和硝态氮含量在各个土层分布较均匀,变化趋势不明显。0~60 cm的土壤含水量表现为绿洲与荒漠过渡带(12.89%)>人工平原绿洲(12.80%)>山前绿洲(12.55%),土壤盐分含量呈现人工平原绿洲( $3.44\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )>绿洲与荒漠过渡带( $2.69\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )>山前绿洲( $1.93\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),人工平原绿洲和山前绿洲土壤盐分存在显著差异( $P<0.05$ ),人工平原绿洲土壤属于轻度盐渍化。土壤铵态氮含量表现为绿洲

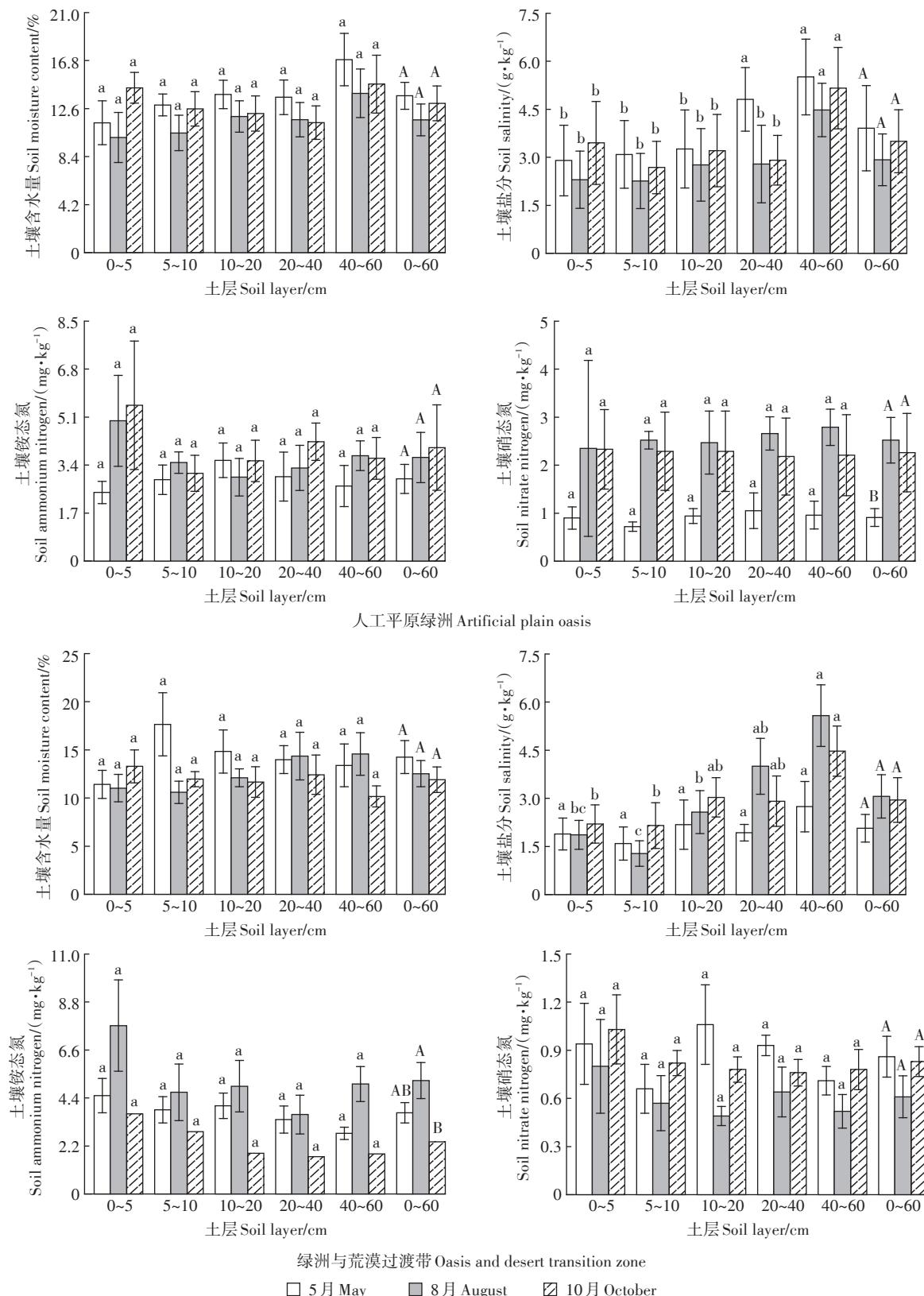


不同小写字母表示同一季节不同土层之间差异显著,不同大写字母表示不同季节间差异显著( $P<0.05$ )

Different lowercase letters indicate significant differences among soil layers for the same month. Different uppercase letters indicate significant differences among months ( $P<0.05$ )

图2 不同区域土壤水分、盐分、铵态氮和硝态氮的季节变化

Figure 2 Seasonal changes of soil moisture, salinity, ammonium nitrogen and nitrate nitrogen in different regions



不同小写字母表示同一季节不同土层之间差异显著,不同大写字母表示不同季节间差异显著( $P<0.05$ )

Different lowercase letters indicate significant differences among soil layers for the same month. Different uppercase letters indicate significant differences among months ( $P<0.05$ )

续图2 不同区域土壤水分、盐分、铵态氮和硝态氮的季节变化

Continued figure 2 Seasonal changes of soil moisture, salinity, ammonium nitrogen and nitrate nitrogen in different regions

与荒漠过渡带( $3.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )>人工平原绿洲( $3.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )>山前绿洲( $3.46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),土壤硝态氮含量表现为山前绿洲( $2.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )>人工平原绿洲( $1.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )>绿洲与荒漠过渡带( $0.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。按照变异系数划分等级:当 $CV<0.1$ 时为弱变异性; $0.1<CV<1$ 时为中等变异性; $CV>1$ 时为强变异性<sup>[22]</sup>。整体上,不同区域的各土层土壤水盐和养分均属于中等或者强变异强度,不同区域的土壤水盐与养分的变异在夏秋

季节大于春季,不同区域土壤含水量的变异强度弱于土壤盐分和养分(表2)。

## 2.2 土壤水分-盐分-养分空间变异特征

原始数据多为非正态性分布,将数据对数转换符合正态分布后(表3),据半方差函数理论及计算模型得出山前绿洲、人工平原绿洲和绿洲与荒漠过渡带0~60 cm的土壤水分、盐分和养分的变异函数模型及相关参数(表4)。块金值与基台值的比值为块金系

表2 不同绿洲生态系统土壤水分、盐分和养分的变异系数

Table 2 Variation coefficients of soil moisture, salinity and nutrients in different oasis ecosystems

月份 Month	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				
	土层 Layer/ cm	含水量 Moisture content	盐分 Salinity	铵态氮 Ammonium nitrogen	硝态氮 Nitrate nitrogen	含水量 Moisture content	盐分 Salinity	铵态氮 Ammonium nitrogen	硝态氮 Nitrate nitrogen	含水量 Moisture content	盐分 Salinity	铵态氮 Ammonium nitrogen	硝态氮 Nitrate nitrogen
5	0~5	0.48	0.62	0.43	0.33	0.40	0.62	0.38	0.60	0.29	0.95	0.39	0.60
	5~10	0.39	0.36	0.59	0.51	0.17	0.36	0.51	0.31	0.42	0.73	0.35	0.52
	10~20	0.34	0.51	0.67	0.19	0.21	0.51	0.40	0.38	0.34	0.79	0.32	0.52
	20~40	0.49	0.41	0.41	0.29	0.26	0.41	0.68	0.83	0.23	0.30	0.41	0.15
	40~60	0.47	0.41	0.49	0.34	0.32	0.41	0.65	0.71	0.37	0.64	0.23	0.28
	0~60	0.38	0.38	0.47	0.26	0.20	0.38	0.41	0.48	0.27	0.47	0.28	0.33
8	0~5	0.97	1.15	0.92	0.79	0.51	1.15	0.76	1.83	0.29	0.78	0.61	0.82
	5~10	1.04	1.30	0.43	1.62	0.35	1.30	0.92	2.03	0.25	0.69	0.62	0.67
	10~20	0.80	1.45	0.95	1.89	0.27	1.45	0.52	1.87	0.17	0.58	0.54	0.27
	20~40	0.84	1.65	0.60	1.82	0.30	1.65	0.57	1.98	0.39	1.05	0.55	0.54
	40~60	0.74	1.51	0.65	1.90	0.36	1.51	0.71	1.92	0.34	0.88	0.35	0.45
	0~60	0.69	1.43	0.38	1.58	0.28	1.43	0.57	1.93	0.24	0.71	0.36	0.48
10	0~5	0.24	1.16	0.66	0.64	0.22	1.16	0.97	0.83	0.29	0.61	1.04	0.47
	5~10	0.23	1.14	1.47	0.70	0.28	1.14	0.56	0.83	0.15	0.74	0.86	0.21
	10~20	0.34	1.48	0.66	0.58	0.30	1.48	1.14	0.86	0.31	1.19	0.72	0.23
	20~40	0.43	1.46	1.24	0.59	0.30	1.46	0.87	0.86	0.37	0.60	0.93	0.24
	40~60	0.64	1.39	1.36	0.55	0.40	1.39	1.37	0.90	0.24	0.69	0.51	0.36
	0~60	0.38	1.35	1.13	0.59	0.28	1.35	0.88	0.85	0.25	0.68	0.61	0.25

表3 不同区域土壤性质数据(0~60 cm)正态性检验(S-W)

Table 3 Shapiro-Wilk test of soil property data in different region (0~60 cm)

区域 Region	月份 Month	原始数据 Original data				对数转换数据 Logarithmic transformation data			
		含水量 Moisture content/%	盐分 Salinity/ (g·kg <sup>-1</sup> )	铵态氮 Ammonium nitrogen/(mg·kg <sup>-1</sup> )	硝态氮 Nitrate nitrogen/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	含水量 Moisture content	盐分 Salinity	铵态氮 Ammonium nitrogen	硝态氮 Nitrate nitrogen
山前绿洲 Piedmont oasis	5	0.708	0.708	0.310	0.615	0.267	0.265	0.258	0.644
	8	0.543	0.543	0.000	0.889	0.574	0.057	1.000	0.018
	10	0.973	0.973	0.001	0.001	0.560	0.112	0.279	0.062
人工平原绿洲 Artificial plain oasis	5	0.629	0.030	0.014	0.072	0.191	0.242	0.124	0.850
	8	0.881	0.054	0.085	0.000	0.311	0.057	0.970	0.057
	10	0.505	0.161	0.001	0.010	0.361	0.477	0.316	0.296
绿洲与荒漠过渡带 Oasis and desert transition zone	5	0.565	0.207	0.235	0.711	0.128	0.830	0.302	0.637
	8	0.251	0.194	0.589	0.226	0.130	0.322	0.312	0.251
	10	0.153	0.207	0.114	0.323	0.177	0.945	0.507	0.533

表4 不同绿洲生态系统土壤水分、盐分和养分半方差函数类型及其参数

Table 4 Semivariogram types and parameters of soil moisture, salinity and nutrients in different oasis ecosystems

项目 Item	月份 Month	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			
		含水量 Moisture content	盐分 Salinity	铵态氮 Ammonium nitrogen	硝态氮 Nitrate nitrogen	含水量 Moisture content	盐分 Salinity	铵态氮 Ammonium nitrogen	硝态氮 Nitrate nitrogen	含水量 Moisture content	盐分 Salinity	铵态氮 Ammonium nitrogen	硝态氮 Nitrate nitrogen
理论模型 Theoretical model	5	高斯	线性	球状	球状	高斯	线性	线性	高斯	高斯	线性	线性	高斯
	8	球状	高斯	线性	高斯	线性	球状	高斯	高斯	线性	球状	线性	高斯
	10	高斯	高斯	线性	线性	球状	指数	高斯	高斯	高斯	线性	线性	线性
块金值 Nugget	5	0.049	0.205	0	0.001	0.003	0.626	0.150	0.196	0	0.296	0.066	0
	8	0.054	0.010	0.111	1.350	0.101	0.001	0.173	0.761	0.804	0.052	0.128	0.001
	10	0	0.010	0.465	0.688	0.027	0.073	0.001	0.001	0	0.508	0.060	0.029
基台值 Abutment value	5	0.617	0.205	0.194	0.108	0.135	0.626	0.150	2.402	0.123	0.296	0.066	0.131
	8	0.251	3.417	0.111	4.518	0.101	0.392	2.356	3.532	0.080	0.641	0.128	2.011
	10	0.228	3.214	0.465	0.688	0.080	0.575	2.358	0.635	0.052	0.508	0.060	0.029
块金系数 Nugget coefficient	5	7.94	100.00	0.05	0.92	2.22	100.00	100.00	8.16	0.08	100.00	100.00	0.08
	8	21.51	0.29	100.00	29.88	100.00	0.26	7.34	21.55	100.00	8.11	100.00	0.05
	10	0.04	0.31	100.00	100.00	33.21	12.70	0.04	0.16	0.19	100.00	100.00	100.00
变程 Range/m	5	361 479	78 632	22 200	22 600	121 590	76 800	39 674	197 453	15 588	33 782	33 782	19 399
	8	27 300	41 049	78 632	196 241	84 522	13 900	329 782	183 250	84 334	17 000	33 782	89 274
	10	26 327	40 356	78 632	78 632	33 300	18 600	74 478	27 366	17 840	33 782	33 782	33 782
决定系数 $R^2$	5	0.343	0.916	0.436	0.211	0.791	0.471	0.767	0.657	0.162	0.998	0.402	0.276
	8	0.062	0.948	1.000	0.879	0.411	0.008	0.620	0.694	0.472	0.151	0.939	0.987
	10	0.275	0.980	0.744	0.999	0.141	0.012	0.504	0.481	0.425	0.999	0.860	0.961
残差 Residual	5	0.015	0.065	0.006	0.017	0.003	0.299	0.009	0.015	0.058	0.190	0.002	0.021
	8	0.125	0.446	0.014	0.122	0.023	0.036	0.043	0.392	0.013	0.196	0.543	0.003
	10	0.112	0.128	0.105	0.038	0.005	0.374	4.180	0.176	0.003	0.197	0.013	0.000

数,系数值的大小表示土壤性质空间相关性的程度高低。块金系数小于0.25,说明因素之间具有强空间相关性,主要受结构性因素影响;在0.25~0.75之间说明具有中等空间相关性,受结构性与随机性因素影响;若大于0.75,说明空间相关性较弱,主要受随机性因素影响;若接近于1,说明在整个尺度上具有恒定的变异<sup>[23]</sup>。整体上,山前绿洲、人工平原绿洲和绿洲与荒漠过渡带的土壤水分、盐分和养分的块金系数小于0.25,说明空间变异主要受结构因素的影响,但也存在块金系数等于1的情况,说明不同区域存在由随机因素和结构性因素造成的恒定的变异。5、8月和10月的山前绿洲、人工平原绿洲和绿洲与荒漠过渡带的土壤含水量、盐分和养分大多符合高斯模型和线性模型。从决定系数来看,山前绿洲和绿洲与荒漠过渡带的土壤盐分、铵态氮和硝态氮拟合度较高,人工平原绿洲拟合效果欠佳。

### 2.3 玛纳斯河流域膜下滴灌棉田土壤水分-盐分-养分空间分布格局

空间插值方法不存在绝对的最优插值方法,而是

需要根据研究区的自身样本数据特征和地理环境特征进行选择<sup>[24]</sup>。考虑到研究区实测数据样本的特点,采用反距离权重法对土壤含水量、盐分、铵态氮和硝态氮进行插值,精度误差分析表明效果较好(表5),进而绘制土壤水盐及养分空间分布图(图3)。玛纳斯河流域山前绿洲、人工平原绿洲和绿洲与荒漠过渡带土壤水分-盐分-养分由山前绿洲到绿洲与荒漠过渡带呈现条带状分布。土壤水分和铵态氮由山前绿洲经人工平原绿洲到绿洲与荒漠过渡带依次递减,土壤硝态氮由山前绿洲经人工平原绿洲到绿洲与荒漠

表5 反距离权重法插值结果误差分析

Table 5 Error analysis of interpolation results of inverse distance weight method

土壤性质 Soil property	均方根误差 RMSE		决定系数 $R^2$
	土壤含水量 Soil moisture content	土壤盐分 Soil salinity	
土壤含水量 Soil moisture content	3.177	0.446	0.482
土壤盐分 Soil salinity	1.309	-0.189	0.501
土壤铵态氮 Soil ammonium nitrogen	1.131	-0.039	0.543
土壤硝态氮 Soil nitrate nitrogen	1.684	0.576	0.449

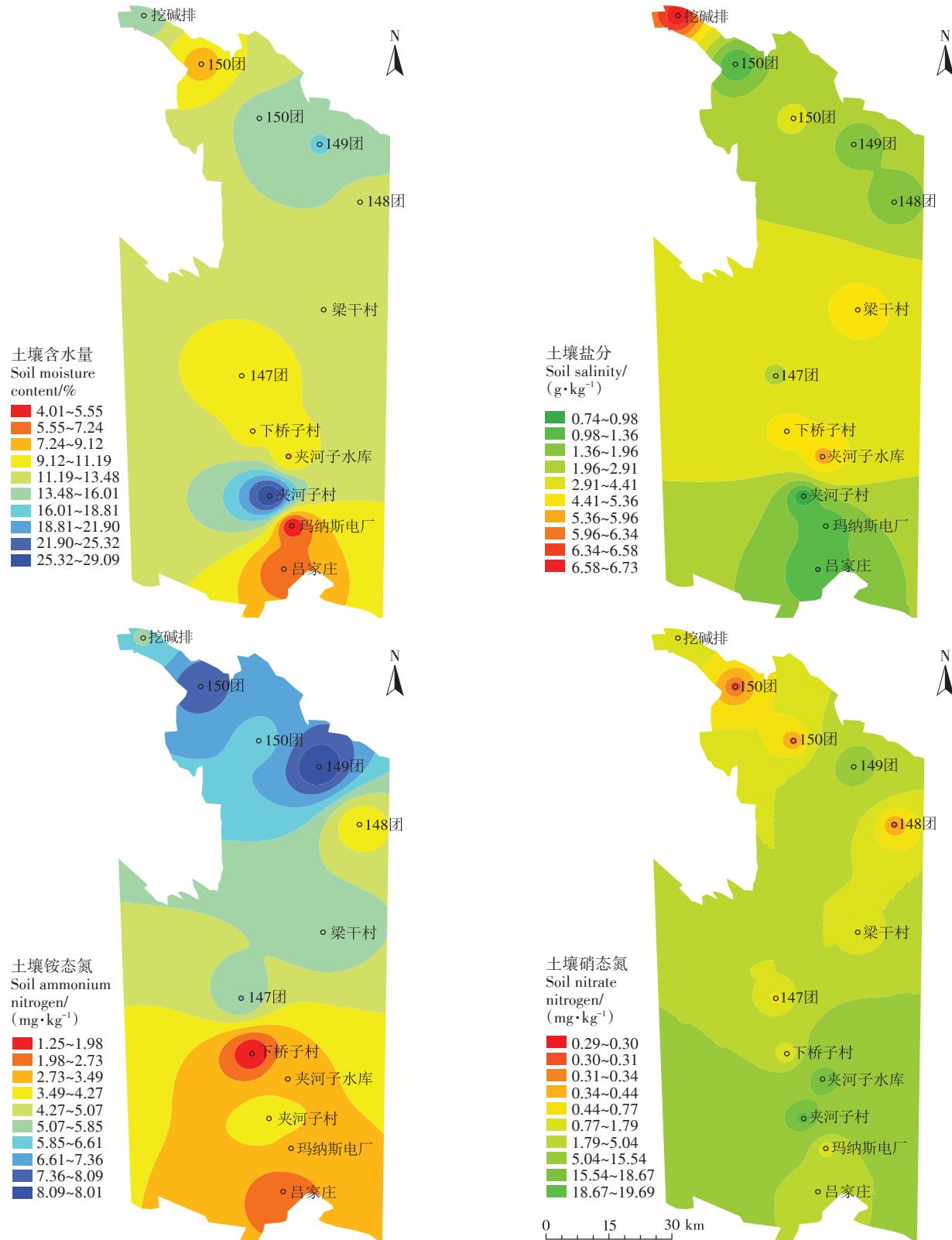


图3 土壤含水量、盐分与铵态氮、硝态氮含量空间分布

Figure 3 Spatial distribution of soil moisture, salinity, ammonium nitrogen and nitrate nitrogen contents

过渡带依次递增。人工平原绿洲土壤盐分高,山前绿洲和绿洲与荒漠过渡带盐分低。土壤含水量高值区

和低值区均在山前绿洲地区,土壤盐分高值区在绿洲与荒漠过渡带,低值区在山前绿洲;土壤铵态氮高值

区主要分布在绿洲与荒漠过渡带,低值区主要分布在山前绿洲;土壤硝态氮高值区主要分布在山前绿洲,低值区主要分布在绿洲与荒漠过渡带。根据《新疆土壤》中土壤干旱程度分级标准<sup>[25]</sup>,山前绿洲、人工平原绿洲和绿洲与荒漠过渡带的土壤整体处于轻旱程度。根据《新疆土壤》中土壤盐分分级标准,山前绿洲土壤属于非盐渍化,人工平原绿洲土壤整体属于轻度盐渍化,绿洲与荒漠过渡带北部靠近沙漠部分属于中度盐渍化。山前绿洲、人工平原绿洲和绿洲与荒漠过渡带的土壤铵态氮和硝态氮含量均偏低。

### 3 讨论

#### 3.1 土壤水分-盐分-养分空间变异影响因素

研究结果显示,不同区域棉田的土壤水盐与养分呈强的空间自相关或是存在恒定的变异,这主要受山盆体系造成的结构性因素以及人为耕种管理等随机因素影响。整体来看,山前绿洲、人工平原绿洲和绿洲与荒漠过渡带土壤水盐与养分变异的主导因素是土壤类型和地下水条件,棉田的滴灌和施肥是影响土壤水盐与养分最重要的人为因素。玛纳斯河流域是典型的山盆结构体系(图4),山前绿洲、人工平原绿洲和绿洲荒漠过渡带的土壤、地下水位和气候等明显不同<sup>[18]</sup>。河流在出山口进入山前平原后流速减慢,携带的泥沙等逐渐沉积。山前平原是老绿洲的主要分布地,开发时间悠久,土壤成熟度高,土壤含盐量低;人工平原绿洲是水库主要分布地,地下水位较高,这

一区域主要分布着新老绿洲,膜下滴灌技术推广后,棉田面积扩张迅速,膜下滴灌技术并未将盐分带走,因此人工平原绿洲土壤盐分较高,达到轻度盐渍化程度;绿洲与荒漠过渡带位于河流下游,靠近沙漠,质地以沙壤土和沙土为主,地下水位低,此区域主要是新中国成立后开发的新绿洲,土壤盐分比山前平原绿洲高<sup>[26-28]</sup>。

#### 3.2 不同绿洲生态系统土壤水盐与养分差异性分析

研究表明,山前平原绿洲和绿洲与荒漠过渡带的土壤水盐和铵态氮含量季节变化性一致,人工平原绿洲则与两个区域不一致,这与气候、灌溉和地下水位变化有关。山前平原绿洲和绿洲与荒漠过渡带的土壤盐分表现为8月>10月>5月。在8月,气温高,蒸发强,土壤水上升旺盛,盐分随之增加;在10月,地膜遭受破坏,地表裸露,蒸发量加大,造成土壤盐分在土壤表层集聚。这与赵永成等<sup>[29]</sup>在玛纳斯河流域农八师121团研究得到的棉田土壤盐分在5月上旬、7月中旬、9月中旬呈现积盐趋势的结果相似。然而,人工平原绿洲土壤盐分的变化趋势为5月>10月>8月,这可能是因为人工平原绿洲的年内地下水埋深变化已呈现开采型,在7、8月,地下水下降迅速,地下水位低于绿洲与荒漠过渡带<sup>[30]</sup>,地下水埋深变深和7、8月农业灌溉频繁使得人工平原绿洲8月的土壤盐分下降<sup>[31]</sup>。本研究表明人工平原绿洲和绿洲与荒漠过渡带面临盐渍化威胁,土壤铵态氮高值区主要分布在绿洲与荒漠过渡带,土壤硝态氮高值区主要分布在山前

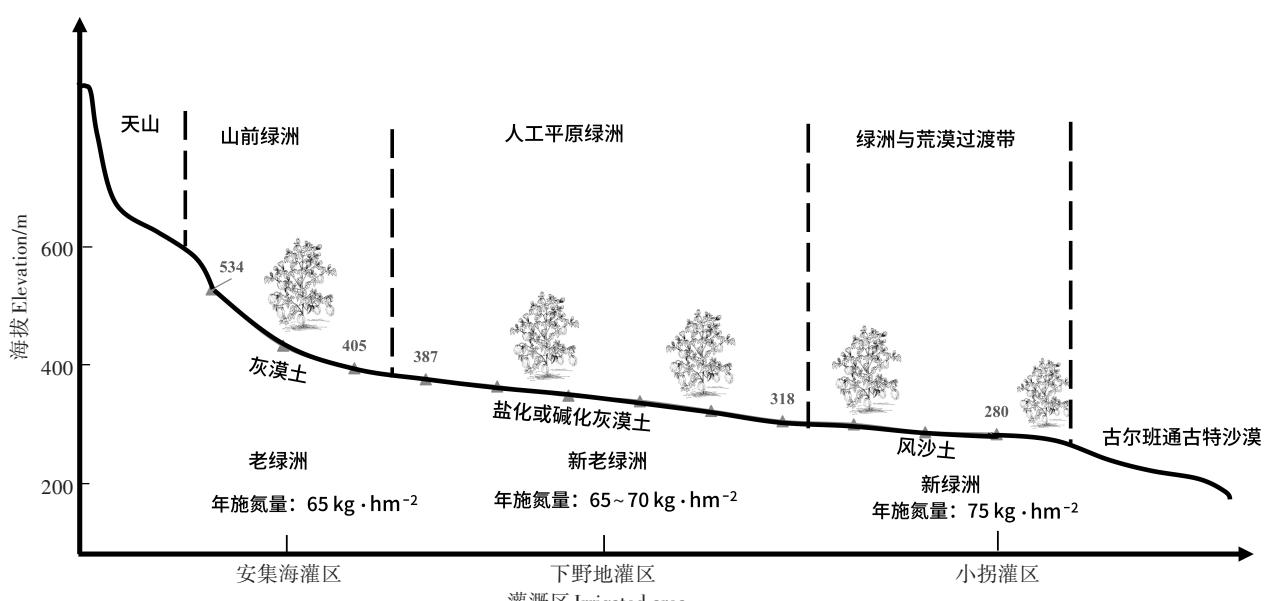


图4 玛纳斯河流域概况图

Figure 4 Overview of Manas River basin

绿洲。这与李玉义等<sup>[18]</sup>、陈接华等<sup>[19]</sup>对玛纳斯河流域不同地貌类型的土壤盐分和养分的研究结果一致。

不同流域的绿洲,由于土壤类型、气候条件、地下水水位、开发历史与利用方式以及人为采样的差异,土壤的水盐与养分的含量有所不同。与其他绿洲相比(表6),玛纳斯河流域的土壤含水量为0.11%~29.46%,低于我国塔里木河流域绿洲,与黑河流域和艾比湖流域绿洲相近;土壤含盐量为0.29~20.34 g·kg<sup>-1</sup>,高于我国塔里木河流域绿洲、石羊河和艾比湖流域绿洲,玛纳斯河流域的人工平原绿洲多在盐碱土的基础上开发利用,也是最先开展膜下滴灌的区域,土壤盐分没有其他渠道排走,因此盐分较高;玛纳斯河流域绿洲土壤硝态氮含量为0.07~29.08 mg·kg<sup>-1</sup>,明显低于黑河流域绿洲,玛纳斯河流域农田以种植棉花为主,黑河流域农田以种植玉米为主,种植品类和浇水施肥方式的不同是造成土壤硝态氮差异的主要原因。综上,玛纳斯河流域绿洲农田相对于黑河流域、塔里木河流域和艾比湖流域等农田,土壤盐分较高、速效养分较低。

## 4 结论

(1) 玛纳斯河流域山前绿洲、人工平原绿洲和绿洲与荒漠过渡带的土壤水盐、铵态氮和硝态氮属于中等或强变异,各区域土壤水盐与铵态氮、硝态氮均存在季节性变化特征。

(2) 山前绿洲、人工平原绿洲和绿洲与荒漠过渡带的土壤水盐、铵态氮和硝态氮的空间分异明显。山前绿洲与人工平原绿洲的土壤盐分存在显著差异,人工平原绿洲的土壤盐分高于山前绿洲和绿洲与荒漠过渡带,属于轻度盐渍化。各区域土壤含水量和盐分呈现出由表层至深层逐渐增加的趋势。

(3) 山前绿洲、人工平原绿洲和绿洲与荒漠过渡带的土壤水盐与养分受土壤类型和地下水位等结构因素影响,空间相关性强,但受农业耕作管理的影响,

其存在恒定的变异情况。

## 参考文献:

- [1] QUINE T A, ZHANG Y. An investigation of spatial variation in soil erosion, soil properties, and crop production within an agricultural field in Devon, United Kingdom[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 57(1):55~65.
- [2] 王让会, 马映军. 干旱区山盆体系物质能量及信息的耦合关系——以塔里木盆地周边山地系统为例[J]. *山地学报*, 2001, 19(5):398~402. WANG R H, MA Y J. Coupling relation among substance and energy as well as information in mountain basin system in arid zone: Taking mountainous system around Tarim basin as an example[J]. *Mountain Research*, 2001, 19(5):398~402.
- [3] SSAID E M, AMAL, T F, et al. Application of geostatistical methods for the spatial distribution of soils in the irrigated plain of Doukkala, Morocco[J]. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2019, 5(2):1~19.
- [4] BAHAREH A, AHMAD J, HOSSEIN K, et al. Sub-basin scale spatial variability of soil properties in central Iran[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2017, 10(6):136~144.
- [5] TAHBOUB A A, ABBASSI B E, TAANY R A, et al. Spatial variability of topsoil salinity in the lower reaches of Zerka River, central Jordan Valley[J]. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 2007, 5(3/4):368~373.
- [6] GOENSTER-JORDAN S, GANOURA R, JORDAN G, et al. Spatial variability of soil properties in the floodplain of a river oasis in the Mongolian Altay Mountains[J]. *Geoderma*, 2018, 330:99~106.
- [7] 司建华, 冯起, 鱼腾飞, 等. 额济纳绿洲土壤养分的空间异质性[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(12):2600~2606. SI J H, FENG Q, YU T F, et al. Spatial heterogeneity of soil nutrients in Ejina oasis[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(12):2600~2606.
- [8] 王玉刚, 李彦. 灌区间盐分变迁与耕地安全特征——以三工河流域农业绿洲为例[J]. *干旱区地理*, 2010, 33(6):896~903. WANG Y G, LI Y. Transformation of soil salinity in irrigational regions and cropland security: A case study in agricultural oasis of the Sangong River catchment[J]. *Arid Land Geography*, 2010, 33(6):896~903.
- [9] 刘洪波, 丁邦新, 白云岗, 等. 典型干旱区绿洲春季土壤盐分空间分布特征分析[J]. *土壤通报*, 2021, 52(2):279~285. LIU H B, DING B X, BAI Y G, et al. Spatial distribution characteristics of soil salinity in an oasis of typical arid regions in spring[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(2):279~285.

表6 不同流域绿洲生态系统的土壤水盐与养分

Table 6 Soil moisture, salinity and nutrients of different oasis ecosystems

区域 Region	土壤含水量 Soil moisture content/%	土壤盐分含量 Soil salt content/(g·kg <sup>-1</sup> )	土壤养分含量 Soil nutrient content/(mg·kg <sup>-1</sup> )
塔里木河流域 <sup>[9,32~33]</sup>	2.70~51.70	2.5~5.48	有机质 200~1 980
黑河流域 <sup>[34]</sup>	1.27~27.40	—	硝态氮 0.06~261.62
石羊河流域 <sup>[35~37]</sup>	0.46~15.51	0.29~10.35	速效氮 12.00~69.30
艾比湖流域 <sup>[10,24]</sup>	2.90~23.28	1.23~14.79	碱解氮 103.82
玛纳斯河流域	0.11~29.46	0.29~20.34	硝态氮 0.07~29.08

- [10] 赵明亮,李艳红,朱海强.艾比湖流域不同生态系统土壤水盐空间异质性分析[J].土壤通报,2016,47(6):1306-1313. ZHAO M L, LI Y H, ZHU H Q. Analysis of the spatial variability of soil moisture and salinity under different ecosystems in Ebinur Lake basin[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(6):1306-1313.
- [11] 杨学涛,李品芳,侯振安,等.玛纳斯河流域不同地貌单元弃耕地土壤盐分差异研究[J].土壤学报,2012,49(6):1241-1246. YANG X T, LI P F, HOU Z A, et al. Temporal and spatial variability of soil salinity in deserted cropland as affected by landform in the Manas River valley[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(6):1241-1246.
- [12] 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. ZHANG Y Y, ZHANG L, DONG G Q, et al. Salinized soil in oasis of Manas River basin interannual dynamic change[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(19):93-103.
- [13] 吕廷波,何新林,辛明亮,等.玛纳斯河流域不同土壤质地土壤含盐量分析[J].节水灌溉,2014,225(5):4-6. LÜ T B, HE X L, XIN M L, et al. Salinity analysis of different soil texture in Manas River basin[J]. *Water Saving Irrigation*, 2014, 225(5):4-6.
- [14] 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. WANG H J, DONG T Y, ZHU Y Q, et al. Profile distribution of heavy metals in soil from long-term continuous cropping cotton field in Manas River basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(11):2216-2225.
- [15] 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. SHEN H, JILILI A. Spatial distribution of soil moisture and salinity and their influence factors in the farmland of Manas River catchment, northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(3):769-776.
- [16] 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. AYIGULI M, JILILI A, GE Y X. Spatial variability and pattern of soil nutrients in the oasis of Manas River watershed[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(9):153-159.
- [17] WANG J, LIU Y, WANG S, et al. Spatial distribution of soil salinity and potential implications for soil management in the Manas River watershed, China[J]. *Soil Use and Management*, 2020, 36(1):93-103.
- [18] 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,2007,113(2):60-64. LI Y Y, ZHANG F H, PAN X D, et al. Changes of salt accumulation in soil layers with different landforms in Manas River valley in Xinjiang region of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 113(2):60-64.
- [19] 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. CHEN J H, WANG S M, CAO G D, et al. Study on soil physical properties under different landforms and vegetation types in Manas River watershed[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2012, 49(2):354-361.
- [20] ROSENSTOCK T S, LIPTZIN D, DZURELLA K, et al. Agriculture's contribution to nitrate contamination of Californian groundwater (1945—2005)[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2014, 43(3):895-907.
- [21] 封玲.玛纳斯河流域农业开发与生态环境变迁研究[D].南京:南京农业大学,2005:8-17. FENG L. A study on agricultural development and changes in ecological environment in Manasi River basin [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2005:8-17.
- [22] 胡克林,李保国,林启美,等.农田土壤养分的空间变异性特征[J].农业工程学报,1999,15(3):33-38. HU K L, LI B G, LIN Q M, et al. Spatial variability of soil nutrient in wheat field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1999, 15(3):33-38.
- [23] 刘丽娟,王玉刚,李小玉.干旱区绿洲土壤可溶性无机碳的空间分布特征[J].生态学杂志,2013,32(10):2539-2544. LI L J, WANG Y G, LI X Y. Spatial distribution pattern of soil dissolved inorganic carbon in an arid oasis[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(10):2539-2544.
- [24] 张金燕,毋兆鹏,于辉,等.干旱区精河流域绿洲化过程中土壤养分时空变异研究[J].中国农业资源与区划,2020,41(2):252-260. ZHANG J Y, WU Z P, YU H, et al. Spatiotemporal variation of soil nutrients in the process of the Jinghe River basin in arid region[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2020, 41(2):252-260.
- [25] 新疆维吾尔自治区农业厅,新疆维吾尔自治区土壤普查办公室.新疆土壤[M].北京:科学出版社.1996. Department of Agriculture of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Xinjiang Uygur Autonomous Region Soil Survey Office. Xinjiang soil[M]. Beijing: Science Press. 1996.
- [26] 张凤华,赵强,潘旭东,等.新疆玛河流域绿洲土壤特性空间分异与合理开发模式[J].水土保持学报,2005(6):55-58. ZHANG F H, ZHAO Q, PAN X D, et al. Spatial differentiation and exploration direction of soil characteristic in valley of Manas River in Xinjiang[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005(6):55-58.
- [27] 夏军,王绍明,朱宏伟,等.玛纳斯河流域中下游土壤盐分空间变异性研究[J].新疆农业科学,2012,49(3):542-548. XIA J, WANG S M, ZHU H W, et al. Spatial heterogeneity of soil salinity in middle and lower reaches of Manas River basin[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2012, 49(3):542-548.
- [28] 颜安,蒋平安,盛建东,等.玛纳斯河流域表层土壤盐分空间变异特征研究[J].土壤学报,2014,51(2):410-414. YAN A, JIANG P A, SHENG J D, et al. Spatial variability of surface soil salinity in Manas River basin[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(2):410-414.
- [29] 赵永成,虎胆·吐马尔白,马合木江·艾合买提,等.北疆常年膜下滴灌棉田土壤盐分年内及年际变化特征研究[J].干旱地区农业研究,2015,33(5):130-134,162. ZHAO Y C, HU DAN T, MAHE MUJIANG A, et al. Study on the variation characteristics of soil salt in cotton field during the year and interannual by perennial drip irrigation under plastic film in northern Xinjiang[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(5):130-134, 162.
- [30] 陈彬鑫,何新林,杨丽莉,等.莫索湾灌区近22年来地下水埋深变化及影响因素分析[J].干旱区资源与环境,2020,34(12):155-

160. CHEN B X, HE X L, YANG L L, et al. Analysis of groundwater depth change and the influencing factors in Mosuowan irrigated area in recent 22 years[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, 34(12):155–160.
- [31] 郑琦, 王海江, 李万涛, 等. 玛纳斯河流域土壤盐渍化影响因素研究[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(3):214–220. ZHENG Q, WANG H J, LI W T, et al. Factors influencing soil salinization in Marnasi River basin, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(3):214–220.
- [32] 莫治新, 尹林克, 吕双庆. 塔里木河中下游地区土壤有机质空间变异性研究[J]. 塔里木大学学报, 2005(4):39–41. MO Z X, YIN L K, LÜ S Q. Study on the spatial variability of soil nutrient in the middle section of Tarim River[J]. *Journal of Tarim University*, 2005(4):39–41.
- [33] 贡璐, 韩丽, 任曼丽, 等. 塔里木河上游典型绿洲土壤水盐空间分异特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4):251–255, 278. GONG L, HAN L, REN M L, et al. Spatial variability of soil water-salt in a typical oasis on the upper reaches of the Tarim River[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(4):251–255, 278.
- [34] 高进长, 苏永红, 席海洋, 等. 黑河下游河流沿岸土壤养分和盐分的研究[J]. 水土保持学报, 2012, 26(5):94–98, 102. GAO J C, SU Y H, XI H Y, et al. Studies on soil nutrient and salinity along the lower reaches area of Heihe River in arid regions, northwest of China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(5):94–98, 102.
- [35] 李会亚, 冯起, 陈丽娟, 等. 民勤绿洲灌区表层土壤盐分空间变异性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(4):136–141. LI H Y, FENG Q, CHEN L J, et al. Spatial distribution characteristics of top-soil salinity in the Minqin oasis, northwest China[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(4):136–141.
- [36] 陈丽娟, 冯起, 成爱芳. 民勤绿洲土壤水盐空间分布特征及盐渍化成因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(11):99–105. CHEN L J, FENG Q, CHENG A F. Spatial distribution of soil water and salt contents and reasons of saline soils development in the Minqin oasis [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(11):99–105.
- [37] 吕晓东, 马忠明, 杨虎德. 民勤绿洲耕作土壤养分时空变异特征及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2010, 27(4):487–494. LÜ X D, MA Z M, YANG H D. Temporal-spatial characteristics and impact factors in soil nutrients of arable soil in Minqin oasis[J]. *Arid Zone Research*, 2010, 27(4):487–494.