

干旱区不同景观单元土壤盐分的变化特征*

王玉刚 郑新军 李彦**

(中国科学院新疆生态与地理研究所阜康荒漠生态站,绿洲生态与荒漠环境重点实验室,乌鲁木齐 830011)

摘要 针对内陆河流域空间土壤盐渍化问题,以新疆三工河流域为例,通过调查、取样分析,研究了冲洪积扇和冲洪积平原 2 个水文地质带上一个生长季 5—10 月 0~10、10~20 cm 土壤盐分积聚特征及其主导因素。结果表明:冲洪积扇土壤盐分含量明显低于冲洪积平原,盐分含量的变异系数均 >100%,属于强变异性;灌溉景观土壤盐分的积聚在冲洪积扇和冲洪积平原相似,盐分含量均减小,而非灌溉景观的差异较大,冲洪积扇区土壤盐分含量减小,土壤盐渍化程度减弱,而冲洪积平原区土壤盐分含量升高,盐渍化程度增强。冲洪积扇区土层间盐分变化关系紧密相关($P < 0.01$),降雨和灌溉对盐分都具有淋洗作用,促进了盐分含量的减少;冲洪积平原区,蒸发对非灌溉景观 0~10 cm 土层盐分积聚起到促进作用,而 10~20 cm 土层盐分积聚受上层土壤盐分和地下水位共同作用。

关键词 内陆河流域;盐分积聚;灌溉景观;非灌溉景观

中图分类号 S156.4 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2009)11-2293-06

Change characteristics of soil salt content in different landscape units in arid region. WANG Yu-gang, ZHENG Xin-jun, LI Yan (*Fukang Station of Desert Ecology, Key Laboratory of Oasis Ecology and Desert Environment, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China*). *Chinese Journal of Ecology* 2009 28(11) 2293-2298.

Abstract : Aiming at the problem of soil salinization in inland river basin, a case study was conducted in the Sangong River catchment of Xinjiang, China. The characteristics and dominant affecting factors of salt accumulation in 0-10 cm and 10-20 cm soil layers in two hydro-geological zones, *i. e.*, alluvial-proluvial delta and alluvial plain, were studied in a growth season (from May to October), and the precipitation, evaporation, groundwater table, and irrigation were also taken into account. The soil salt content was obviously lower in alluvial-proluvial delta than in alluvial plain, but its coefficient of variation in the two zones was all higher than 100%, indicating a great variability. The soil salt accumulation in irrigated landscape in the two zones had a similar decreasing trend, but that in non-irrigated landscape had greater difference, with a decreased soil salinization in alluvial-proluvial delta, and an increased soil salinization in alluvial plain. In alluvial-proluvial delta, the salt contents in 0-10 cm and 10-20 cm soil layers had a close relationship ($P < 0.01$), and there was a clear process of salt leaching by precipitation and irrigation, leading to the decrease of soil salt content. In alluvial plain, the salt accumulation in 0-10 cm soil layer in non-irrigated landscape was promoted by evaporation, and that in 10-20 cm soil layer was co-affected by the salt content in 0-10 cm soil layer and the groundwater table.

Key words : inland river basin; salt accumulation; irrigated landscape; non-irrigated landscape.

土壤盐渍化问题一直是备受关注的生态环境问题之一(Hillel, 1991; 万忠成等, 2006), 并且是制约土地生产力的重要方面(Amezketta, 2006)。我国是

世界盐渍土资源分布最大的国家, 长期以来, 土壤盐渍化是限制区域土地生产力的主要因素之一, 尤其在西北干旱区, 由于其特殊的地理位置和气候条件使得土壤盐渍化问题显得更为突出(杨劲松, 2008)。研究土壤盐分运移规律是有效防治土壤次生盐渍化的前提和基础, 为此, 干旱区土壤盐渍化问

* 国家自然科学基金项目(40701187)和西部之光资助项目(XBBS200808)。

** 通讯作者 E-mail: liyan@ms.xjlb.ac.cn

收稿日期: 2009-05-18 接受日期: 2009-08-20

题一直为众多学者所关注(Flowers ,1999 ;Benyamini *et al.* 2005 ;Herrero & Pérez-Coveta 2005)。随着人为对水土资源不合理的开发利用 ,区域生态环境不断恶化 ,导致盐碱化土地面积不断扩大 ,盐害已成为 21 世纪世界农业可持续发展的重要问题之一(Jordán *et al.* 2003)。由于受到复杂的地质构造、成土母质、地表径流、地下水位以及景观类型等因素的影响 ,内陆河流域不同水文地质带上的土壤水盐过程存在明显差异(郭占荣和刘花台 2002)。研究表明 ,微地形和气候条件是影响表层土壤盐分空间变化的主要因素 ,并且土壤盐分具有较高的空间变异性 ,这种空间变异性主要由地下水位、排水、灌溉系统以及微地形等因子控制(Cemek *et al.* 2007)。

干旱区许多生态环境问题都是由于人类活动引起的水量和水盐平衡关系改变而产生。在干旱区内陆河流域中 ,由于水及土壤母质含盐 ,土壤表面蒸发强烈 ,加上不当的取水灌溉 ,使得土壤中滞留的盐分不断增加 ,这不仅严重影响了区域社会经济的发展 ,而且对流域生态安全有着很大的威胁(李春艳和邓玉林 2009)。目前 ,针对干旱区土壤盐渍化的研究主要集中于不同灌溉方式下土壤盐分的空间分布、区域水盐平衡的调控、盐碱地的改良与防治技术以及基于遥感、数值模拟等方面(Douaik *et al.* 2005 ;Masoud & Koike 2006 ;杨劲松等 2008) ,而对于不同水文地质单元景观分异所导致的土壤盐分累积变化过程研究还涉及很少。为此 ,本文以三工河流域为例 ,探讨在人为和自然作用下不同水文地质单元土壤盐分的累积发生特征及其主导因素 ,为区域土地安全管理提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

三工河流域(43°09' N—45°29' N ,87°47' E—88°17' E)位于天山北麓中段东部 ,准噶尔盆地南

缘。行政上属新疆昌吉州阜康市(图 1)。流域处于欧亚大陆腹地 ,地形呈南北长条状 ,南高北低 ,由东南向西北倾斜。北部是准格尔盆地古尔班通古特沙漠的南缘 ,南部是天山东段博格达峰。该区新构造运动十分强烈 ,以山前大断裂带为界 ,南部山区剧烈上升 ,北部盆地相对下降。北部山前倾斜平原沉陷区自第四纪以来沉降幅度进一步加大 ,土壤逐渐沉积 ,因而将流域划分为 2 个不同的水文地质带类型(表 1) ,即冲洪积扇(图 1 中水文地质分界南部区域)和冲洪积平原(图 1 中水文地质分界北部区域)。流域自然景观属欧亚大陆中部温带荒漠气候类型 ,夏季炎热干燥 ,冬季严寒 ,降水稀少 ,蒸发量大 ,每年 6—7 月常受干热风危害 ,由于境内存在地势差异 ,气候具有垂直地带性分布特征。本流域自南向北自然植被垂直分异明显 ,在不同的水文地质带内形成不同的植物群落类型。绿洲区土壤类型主要有潮土、灌淤土、灌溉灰漠土和盐渍化土。南部冲洪积扇区域为老绿洲 ,土地利用有上百年的历史 ,耕地面积约占区域面积的 37% ,土壤相对比较肥沃 ,多年年均降水 200 mm ,年均蒸发量为 1817 mm ,年均气温 7.1℃。北部冲洪积平原区为新垦绿洲 ,土

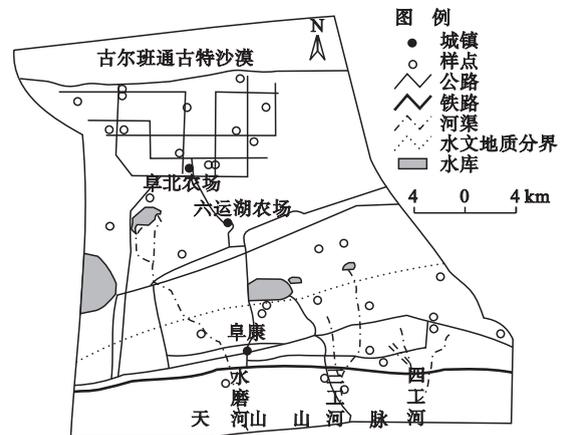


图 1 研究区位置与土壤样点分布示意图

Fig. 1 Location and soil sampling sites in the studied area

表 1 三工河流域不同水文地质带基本特征

Tab. 1 Characteristics of different hydrogeology zones in Sangong River catchment

水文地质带	面积 (km ²)	地下水赋存条件	地下水化学特征	地下水动态特征
冲洪积扇	384	长期处于沉积阶段是地下水的形成区 ,堆积了巨厚的第四纪松散沉积物 ,赋存条件良好 ,地下水位较深 ,扇缘地带地下水位抬升 ,水量较大时有潜水溢出	HCO ₃ -Ca-Mg 型或 HCO ₃ -SO ₄ -Ca-Na + K 型矿化度通常 < 0.8 g · L ⁻¹	渗入 - 径流 - 开采型
冲洪积平原	460	浅层潜水广泛分布 ,地形坡度较小 ,水质差 ,地下水埋深小 ,垂向水交替作用增强 ,地下水位较高 ,多数在 1~3 m	SO ₄ -HCO ₃ -Ca-Na + K-Mg 型或 Cl-SO ₄ -Na + K 型矿化度通常 > 1 g · L ⁻¹	渗入 - 蒸发型

地利用历史近 50 年,耕地面积约占区域面积的 33%,由于地处流域下游,土壤相对比较贫瘠,盐渍化比较严重,年降水量在 88~246 mm,年均降水量 152 mm,年均蒸发量为 1897.4 mm。农作物主要有玉米、小麦、棉花、葡萄等。

1.2 采样区布设与样品的采集

根据不同水文地质带的宽窄和地表植被的特征以及地下水观测站的位置,在三工河流域沿线共设置 32 个采样点(图 1),采样深度分别为 0~10 和 10~20 cm,各采样点的地理位置用 GPS 定位,详细记录地被植物类型、土地利用类型,并且在不同水文地质带上进行日蒸发量和每次降雨量以及地下水位的监测。本研究以作物的一个生长季为研究周期,在区域农田灌溉期 5 月开始全区域采样,每月定期采样 1 次,到 10 月结束。

1.3 样品的处理与分析

将采集的土样在实验室内自然风干,磨碎、过 2 mm 筛后备用。所有的土样均制备 1:5 土水比浸提液,用电导仪测定浸提液的电导率 $EC_{1:5}$ 。测定方法参考鲁如坤(2000),采用常规分析法(土水比 1:5)确定土壤各离子组成,盐分 8 大离子的含量测定法为: K^+ 、 Na^+ 测定采用火焰光度法; Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 测定采用 EDTA 络合滴定法; Cl^- 测定采用 $AgNO_3$ 滴定法; CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 测定采用双指示剂滴定法; SO_4^{2-} 测定采用 EDTA 间接滴定法。各盐离子量之和即为相应的土壤全盐含量。依据土壤全盐含量与浸提液电导率之间的换算关系,进一步计算出土壤全盐含量。该区土壤全盐含量和浸提液电导率之间的换算关系为:

$$S = 0.2711 EC_{1:5}^2 + 4.6804 EC_{1:5} \\ (R^2 = 0.9834, P < 0.001)$$

式中: S 为土壤全盐含量 ($g \cdot kg^{-1}$); $EC_{1:5}$ 为 1:5 土水比土壤浸提液电导率 ($mS \cdot cm^{-1}$)。

2 结果与分析

2.1 土壤盐分的描述性统计分析

对研究区表层土壤盐分进行统计分析,由统计特征值(表 2)可以看出,在冲洪积扇区域 0~20 cm 土层盐分的变化幅度为 0.29~59.37 $g \cdot kg^{-1}$,其中 0~10 cm 的变幅高于 10~20 cm 的变幅,在冲洪积平原区,土层盐分的变化趋势与冲洪积扇区相同。从均值来看,冲洪积扇的土壤盐分在 6~7 $g \cdot kg^{-1}$,而

表 2 三工河流域不同土层盐分含量的描述性统计分析
Tab. 2 Statistical parameters of soil salinity for different layers in Sangong River Catchments

水文地质带	土壤深度 (cm)	均值 ($g \cdot kg^{-1}$)	最小值 ($g \cdot kg^{-1}$)	最大值 ($g \cdot kg^{-1}$)	标准差	变异系数 (%)
冲洪积扇 ($n=14$)	0~10	6.49	0.29	59.37	12.84	197.76
	10~20	6.54	0.32	48.61	12.02	183.79
冲洪积平原 ($n=18$)	0~10	19.51	0.35	115.00	22.88	117.27
	10~20	16.52	0.53	82.17	18.14	109.79

冲洪积平原区 0~10 和 10~20 cm 的平均含盐量均在 16 $g \cdot kg^{-1}$ 以上,由于冲洪积平原在河道的下部,所以土壤盐分含量相对冲洪积扇区高达 2.5 倍以上,并且在冲洪积平原区 0~10 cm 土层土壤盐分均值含量明显高于 10~20 cm 土层,说明土壤盐分在该区域具有表层聚积的特征。在干旱区普遍降水稀少、蒸发强烈,深层土壤中可溶性盐类在毛细管作用下上升并积聚于土壤表层。平均值的变化在冲洪积扇区差异不大,而在冲洪积平原区 0~10 cm 土层明显高于 10~20 cm,相差达 2.99 $g \cdot kg^{-1}$ 。变异系数反映的是样本的离散程度,若该比值 < 10% 说明具有弱的变异性,若该值在 10%~100% 则说明具有中等强度的空间变异,若该比值 > 100% 则说明具有强的变异性(方淑娟等,2003;尤文忠等,2005)。研究区土壤盐分具有较大的变异性,其变异系数均高于 100%。因此在冲洪积扇区和冲洪积平原区表层土壤盐分均有强的变异性,并且土壤盐分的变异性在冲洪积扇要强于冲洪积平原,造成这种差异的因素有景观类型(Wang *et al.*, 2008a, 2008b)、地形(李玉义等,2007)、人为活动(张勃等,2006)等。

2.2 不同水文地质带景观土壤盐分的变化特征

对冲洪积扇和冲洪积平原区不同景观的土壤盐分统计分析(图 2),无论是冲洪积扇还是冲洪积平原从 5—8 月间 0~20 cm 土层盐分含量具明显的下降趋势,8—10 月土壤盐分均表现为先增加后减少,由于在三工河流域区域降雨主要集中在 6—8 月,占全年降雨量的 40% 以上,并且区域农田灌溉也集中在该时段,随着降雨的增多和农业灌溉作用的加强,使得灌溉景观和非灌溉景观土壤盐分含量较少;而 8—9 月间虽然有一定频次的降雨,但相对较小,并且区域灌溉减少,在强烈的蒸发作用下,土壤盐分含量明显增大,9 月以后,研究区处于农业收获期,农业灌溉基本停止,土壤蒸发相对较弱,并且少量的降雨对土壤盐分具有一定的淋洗作用,由此土壤盐分减少。

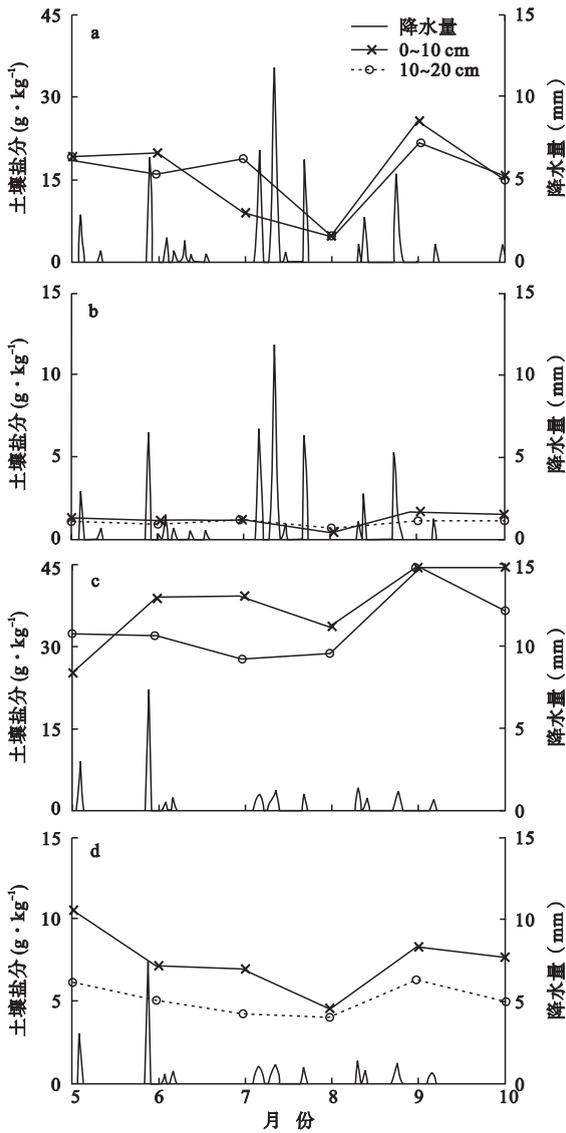


图 2 不同水文地质带灌溉景观和非灌溉景观的土壤盐分
Fig. 2 Soil salt content in irrigated landscape and non-irrigated landscape in different hydrogeology zones
a 为冲洪积扇非灌溉景观, b 为冲洪积扇灌溉景观, c 为冲洪积平原非灌溉景观, d 为冲洪积平原灌溉景观。

在非灌溉景观中(图 2a 和图 2c), 同层土壤盐分冲洪积扇明显低于冲洪积平原, 并且随研究时段的增加, 盐分含量变化呈现相反趋势, 冲洪积扇土壤盐分急剧减少, 到 8 月达到最小, 而在冲洪积平原区, 总体呈现增加趋势, 造成这种差异主要是由于冲洪积扇中上部及冲洪积扇缘地下水位均超过 3 m, 并且呈现下降趋势(王玉刚等 2008)。地下水的波动对土壤表层盐分含量影响很小, 因此冲洪积扇上非灌溉景观类型土壤表层盐分的变化主要受自然降水和蒸发的影响, 而冲洪积平原区地形坡度平缓, 地

下水位较浅, 在临界值附近波动, 并且地下水矿化度通常 $> 1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 从而引起地表积盐的发生(Wang *et al.* 2008a), 除了受降水和蒸发作用还间接的受地下水影响, 因而土壤盐分变化表现出较大的差异。在灌溉景观中(图 2b 和图 2d), 无论是冲洪积扇还是冲洪积平原, 土壤盐分都呈现减少趋势, 同层间盐分变动冲洪积平原明显高于冲洪积扇, 并且在冲洪积扇区同期 0~10 与 10~20 cm 土壤盐分含量相差比冲洪积平原区的小, 由于在冲洪积扇区农业灌溉主要以地表水为主, 并且地下水矿化度较低, 而冲洪积平原区灌溉主要利用的是地下水, 地下水用量占灌溉总量的 58.8%, 地下水矿化度较高。不同水文地质带灌溉水资源利用的差异性, 造成灌溉景观表层土壤盐化作用的不同。

2.3 不同景观类型土壤盐分累积的差异

在干旱内陆河流域中, 农业生产普遍采用沟渠漫灌的灌溉方式, 在灌溉水下渗和强烈的蒸发蒸腾作用下, 土壤中水盐运移活跃(付秋萍等 2007)。以一个生长季为周期, 在冲洪积扇和冲洪积平原区不同景观类型的土壤盐分累积具有明显的特征(图 3)。在冲洪积扇区研究时段内灌溉景观与非灌溉景观中, 无论是 0~10 还是 10~20 cm 土层盐分累

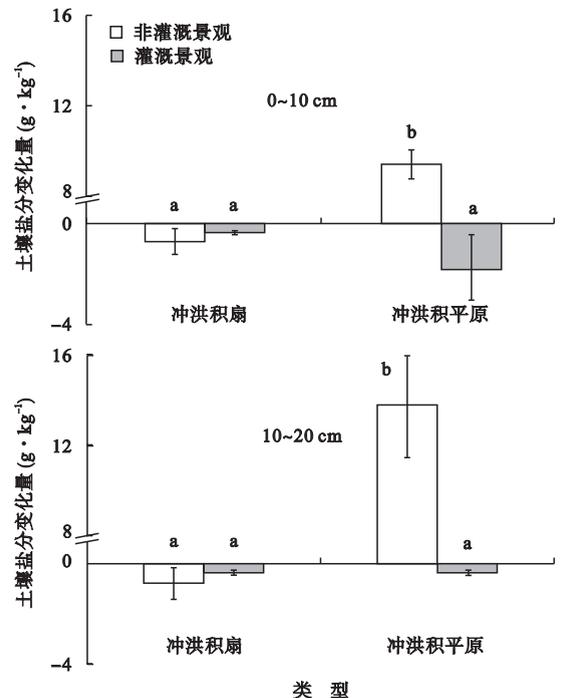


图 3 不同景观类型土壤盐分累积的差异
Fig. 3 Differences of soil salinity accumulation in different landscape types
数值为平均值 \pm 标准差, 不同景观类型上的同一处理的不同字母为显著差异 ($P < 0.05$)。

表3 水文地质带不同景观类型土壤盐分与相关因素的相关关系

Tab.3 Relationship between soil salinity and related factors at different landscape types in hydrogeology zone

	冲洪积扇				冲洪积平原			
	非灌溉景观		灌溉景观		非灌溉景观		灌溉景观	
	0~10 cm	10~20 cm						
0~10 cm	1	0.87**	1	0.98**	1	-0.32	1	0.91**
10~20 cm	0.87**	1	0.98**	1	-0.32	1	0.91**	1
灌溉	-	-	-0.10	-0.09	-	-	-0.81	-0.92*
地下水位	0.334	0.442	0.066	-0.07	-0.16	0.95**	0.55	0.493
降雨	-0.44	-0.77	-0.76	-0.71	0.09	-0.18	-0.34	-0.24
蒸发量	0.22	0.21	0.42	0.34	0.92**	0.57	0.07	0.29

* $\alpha=0.05$ 水平相关性显著; ** $\alpha=0.01$ 水平相关性极显著。

积无显著差异($P < 0.05$),并且盐分的累积量为负值,表明自然降水和人工灌溉对该区域表层土壤均具有一定洗盐作用,使得表层土壤盐分含量减少,即当前的灌溉制度不会引起地表积盐的发生。在冲洪积平原区非灌溉景观土壤盐分累积显著增加(图3, $P < 0.05$),冲洪积平原灌溉与非灌溉景观之间盐分累积具有明显差异(图3, $P < 0.05$),灌溉景观与冲洪积扇景观盐分累积相似,土壤盐分含量减少,土层0~10比10~20 cm盐分减少量明显要高,表明表层土壤更易受到洗盐作用,而非灌溉景观土壤盐分累积显著增加(图3, $P < 0.05$),表现为积盐性,并且10~20 cm土层的累积速率比0~10 cm土层更快,由于深层土壤盐分空间分布主要受地下水影响,冲洪积平原地下水位较低,矿化度高,10~20 cm土层更接近于地下水,在强烈的蒸发作用下,一方面将其下层土壤的盐分聚积,另一方面为上层盐分累积提供盐分来源。

2.4 不同土层盐分变迁的相关因素

通过对研究区不同水文地质带5—10月各月降雨量、蒸发量、监测井地下水水位、灌溉景观灌水量与土壤盐分变化量之间进行多因素 Pearson 相关性拟合检验($n=6$) (表3)。由表3可以看出,在冲洪积扇区无论是灌溉还是非灌溉景观,在蒸发作用下土层间盐分变化关系紧密,0~10 cm土层与10~20 cm土层盐分变化量呈显著的正相关性($P < 0.01$),并且与降雨量和灌水量具有负的相关性,表明区域降雨与灌溉都具有一定的洗盐作用,这一结果与研究时段不同层盐分含量变化相一致(图2)。在冲洪积平原区,非灌溉景观0~10 cm土层盐分变化与蒸发呈负相关性($P < 0.01$),10~20 cm土层盐分变化与0~10 cm土层盐分变化和地下水水位呈正相关性($P < 0.01$)表明蒸发对0~10 cm土层盐分聚积起到促进作用,而10~20 cm土层盐分变化受表层

土壤盐分和地下水共同影响,灌溉景观0~10 cm土层与10~20 cm土层盐分变化量呈正相关性($P < 0.01$),表土层盐分与灌溉量呈负相关关系,并且10~20 cm土层土壤盐分变化与灌溉之间呈负相关性($P < 0.05$),表明灌溉用水对盐分的淋洗作用,在10~20 cm土层作用明显。

3 讨论

现代农业绿洲不仅是干旱区生态环境的重要组成部分,而且也是荒漠地区人类赖以生存和发展的基础。保持绿洲的稳定和安全,最重要的就是防止其内部的次生盐渍化的发生(潘晓玲,2001)。干旱区内陆河流域不同水文地质单元气候、水资源、土壤、景观格局、水资源利用等环境因素差异很大,土壤盐分的累积状况也不同,尤其是表层土壤,受干扰的程度更大。在三工河流域不同的水文地质带上,由于土壤结构、景观类型、地形地貌、降雨量和蒸发等因素,该区域表层土壤盐分含量具有强的变异性。土壤中的盐分具有“盐随水来,盐随水走”的特点(李毅等,2003; Peck & Hatton, 2003),降水脉冲和农田灌溉用水的入渗和再分布使土壤盐分被淋洗至土壤下部,而蒸发作用又会使土壤盐分向上提升至土壤上部和表层。鉴于土壤水分收支平衡的差异,在5—10月期间冲洪积扇区灌溉景观和非灌溉景观土壤盐分均呈现先逐渐减小,随后增加,最后再减小的变化趋势,而冲洪积平原区非灌溉景观土壤盐分不断增加,灌溉景观逐渐减小。从总体上来看,冲洪积扇区表层土壤在5—10月洗盐,10~20 cm土层,它既作为盐分的累积层将其下土壤的盐分累积在该层,又是盐分的传导层为上层盐分累积提供盐分来源。而冲洪积平原非灌溉景观表层土不断积盐,灌溉景观表层土壤盐分含量不断下降,这与强烈的蒸发作用和由灌溉引起的地下水位升高有明显的相关

性(王玉刚等,2008),水文地质带类型是影响土壤水盐分异的关键因素之一。本研究不仅揭示了不同水文地质带土壤盐渍剖面层次之间的内在联系及其动态差异,同时量化了一个生长季5—10月灌溉与非灌溉景观中的盐分累积效应与影响因素,有助于揭示人为和自然作用下不同水文地质单元土壤盐分的变化规律,对研究干旱区内陆河流域土壤盐渍化的发生机理、运移规律具有重要意义。

参考文献

- 付秋萍,张江辉,王全久,等.2007.塔里木盆地土壤盐变化特征分析.自然科学进展,17(8):1091-1097.
- 郭占荣,刘花台.2002.西北内陆灌区土壤次生盐渍化与地下水动态调控.农业环境保护,21(1):45-48.
- 李毅,王文焰,王全久,等.2003.非充分供水条件下滴灌入渗的水盐运移特征研究.水土保持学报,17(1):1-4.
- 李春艳,邓玉林.2009.我国流域生态系统退化研究进展.生态学杂志,28(3):535-541.
- 李玉义,张凤华,潘旭东,等.2007.新疆玛纳斯河流域不同地貌类型土壤盐分累积变化.农业工程学报,23(2):60-63.
- 鲁如坤.2000.土壤农业化学分析方法.北京:中国农业科技出版社.
- 潘晓玲.2001.干旱区绿洲生态系统动态稳定性的初步研究.第四纪研究,21(4):345-350.
- 万志成,王治江,董丽新,等.2006.辽宁省生态系统敏感性评价.生态学杂志,25(6):677-681.
- 王玉刚,肖笃宁,李彦.2008.三工河流域中上游绿洲土壤盐化的时空动态.中国沙漠,28(3):478-484.
- 杨劲松,姚荣江,邹平,等.2008.海涂区不同植被类型下土壤盐渍剖面及其电磁感响应特征.应用生态学报,19(10):2117-2124.
- 杨劲松.2008.中国盐渍土研究的发展历程与展望.土壤学报,45(5):837-845.
- 尤文忠,曾德慧,刘明国,等.2005.黄土丘陵区坡面林-草边界土壤水分特征.应用生态学报,16(9):1591-1596.
- 张勃,孟宝,郝建秀,等.2006.干旱区绿洲-荒漠带土壤水盐异质性及生态环境效应研究——以黑河中游张掖绿洲为例.中国沙漠,26(1):81-84.
- 张淑娟,何勇,方慧.2003.基于GPS和GIS的田间土壤特性空间变异性的研究.农业工程学报,19(2):39-45.
- Amezketta E. 2006. An integrated methodology for assessing soil salinization, a pre-condition for land desertification. *Journal of Arid Environments*, **67**:594-606.
- Benyamini Y, Mirlas V, Marish S, et al. 2005. A survey of soil salinity and groundwater level control systems in irrigated fields in the Jezre'el Valley, Israel. *Agricultural Water Management*, **76**:181-194.
- Cemek B, Guler M, Kenan K, et al. 2007. Assessment of spatial variability in some soil properties as related to soil salinity and alkalinity in Bafra plain in northern Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, **124**:223-234.
- Douaik A, Meirvenne MV, Tóth D. 2005. Soil salinity mapping using spatio-temporal kriging and Bayesian maximum entropy with interval soft data. *Geoderma*, **128**:234-248.
- Flowers TJ. 1999. Salinisation and horticultural production. *Scientia Horticulturae*, **78**:1-4.
- Herrero J, Pérez-Coveta O. 2005. Soil salinity changes over 24 years in a Mediterranean irrigated district. *Geoderma*, **125**:287-308.
- Hillel D. 1991. Research in soil physics: A review. *Soil Science*, **151**:30-34.
- Jordán MM, Navarro-Pedreão J, García-Sánchez E, et al. 2003. Spatial dynamics of soil salinity under arid and semi-arid conditions: Geological and environmental implications. *Environmental Geology*, **45**:448-456.
- Masoud AA, Koike K. 2006. Arid land salinization detected by remotely-sensed landcover changes: A case study in the Siwa region, NW Egypt. *Journal of Arid Environments*, **66**:151-167.
- Peck AJ, Hatton T. 2003. Salinity and the discharge of salts from catchments in Australia. *Journal of Hydrology*, **272**:191-202.
- Wang YG, Li Y, Xiao DN. 2008a. Catchment scale spatial variability of soil salt content in agricultural oasis, Northwest China. *Environmental Geology*, **56**:439-446.
- Wang YG, Xiao DN, Li Y, et al. 2008b. Soil salinity evolution and its relationship with dynamics of groundwater in the oasis of inland river basins: A case study Fubei Region of Xinjiang Province, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, **140**:291-302.

作者简介 王玉刚男,1976年生,博士,副研究员。主要从事干旱区景观生态与区域水土过程研究。E-mail: xj_wyg@163.com
责任编辑 刘丽娟