塔里木沙漠公路防护林咸水灌溉土壤盐渍化状况研究*

王永东[1] 李生宇[1] 徐新文[1†] 雷加强[1] 金小军[1,2,3] 闫 健[3]
王 强[3] 邸 鲲[3] 彭慧清[3]

(1 中国科学院新疆生态与地理研究所,乌鲁木齐 830011)
(2 中国科学院研究生院,北京 100049)
(3 中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司,新疆库尔勒 841000)

摘 要 为了研究塔里木沙漠公路防护林建林后土壤在咸水灌溉条件下的盐渍化状态,本文通过对塔里木沙漠公路防护林建林后沿线土壤盐分分布状况的监测,结合防护林建林前土壤盐分状况普查资料,运用统计分析、相关性分析及灰色关联分析,对防护林沿线的 40 个监测点的土壤盐离子、土壤盐渍化的现状及驱动力作了初步研究。研究结果表明:塔里木沙漠公路防护林建成后,土壤盐分各离子含量均较建成前有了显著增加,其中,阳离子含量 $Na^+ + K^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$,阴离子含量 $Cl^- > CO_3^{2-} > SO_4^{2-} > HCO_3^-$;防护林沿线土壤盐渍化类型以氯化物型与硫酸盐-氯化物型为主,分别占到监测点的 84.2% 与 15.8%;有近 81.6% 的监测点已达到中度盐渍化程度;灰色关联分析结果表明,引起塔里木沙漠公路防护林土壤盐渍化的主要驱动力依次是灌溉年限、地下水矿化度,地下水 pH 和地下水埋深。

关键词 塔里木沙漠公路;防护林;咸水灌溉;土壤盐渍化
中图分类号 154.1 **文献标识码** A

土壤盐渍化问题是干旱区可持续发展和改善环境质量的战略问题[1-2]。干旱区土壤的盐渍化已成为国内外土壤学研究的热点。土壤盐渍化过程是易溶盐分在土壤表层逐步积聚的过程,地表蒸发、入渗过程是盐分在土体中迁移运动的重要驱动力,直接控制着盐分在土体中分布、存在状态[3]。以往的研究表明:土壤盐渍化是由多种因子引起的,其中主要有:土壤因子(土壤的机械组成(质地)、有机质含量、土壤结构、土体构型);气候因子(干燥度),地下水因子(地下水埋深和矿化度)和灌溉因子(灌溉水质和灌水次数)等 8 大因子[4]。田长彦等[5]对新疆土壤盐渍化形成的地质、地貌、气候背景和土壤盐渍化现状的研究表明,新疆的土壤盐渍化问题始终存在。何祺胜等[6]对渭干河-库车河三角洲绿洲盐渍化成因的分析表明,人为活动是形成灌区次生盐渍化的重要条件;而每一个地区的土壤盐渍化类型、程度、特征、成因等又与地下水类型和埋深有着密切的关系[7]。姚荣江等[8]研究发现耕层土壤盐分与地下水矿化度的空间分布具有一定正相关性,而与地下水埋深呈负相关性。

本文通过对塔里木沙漠公路防护林建林后沿线土壤盐分分布状况的监测,结合防护林建设前土壤普查结果,着重分析了防护林在咸水灌溉 4 年后塔里木沙漠公路防护林生态工程沿线土壤盐渍化状况,并分析了塔里木沙漠公路防护林沿线土壤盐渍化的驱动机制以及如何降低和防止土壤盐渍化。本研究成果不仅能够为塔里木沙漠公路防护林土壤盐害的防治提供理论依据,而且对于极端干旱区生态防护林的合理灌溉和防止土壤次生盐渍化有重要的现实意义,最终为塔里木沙漠公路防护林的可持续管护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于塔里木沙漠公路。塔里木沙漠公

* 国家自然科学基金重点项目(41030530)、国家自然科学基金青年项目(40701098)和中国科学院“西部之光博士专项”项目(XBBS200908,XBBS200904)共同资助

† 通讯作者:徐新文(1963—),男,山东菏泽人,研究员,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail:sms@ms.xjb.ac.cn
作者简介:王永东(1978—),男,新疆奇台人,博士,助理研究员,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail:wangyd@ms.xjb.ac.cn
收稿日期:2011-06-22;收到修改稿日期:2011-11-15

路起始于轮台县，终点民丰县，全长 522 km，其中沙漠段介于 37° ~42°N 和 82° ~85°E 之间。公路沿线气候特征表现为热量丰富、光照充足、风力强劲、蒸发强烈且年际变化小等。由于沿线气候极端干旱，植被极为稀疏，土壤发育极差，类型较为简单，大部分地区为风沙土所覆盖，只在丘间低地中分布面积不大的龟裂土、残余盐土、盐土和林灌草甸土，因此风沙土(*Aeolian sandy soil*)是沙漠公路沿线分布最广的土壤类型。研究区地下水以高矿化度地下水为主，矿化度最高 29.7 g L^{-1}，水化学类型以 Cl^-，SO_4^{2-}，K^+，Na^+ 为主(见表 1)。

塔里木沙漠公路防护林生态工程全长 436km。按照因地制宜，适地适树原则，根据不同的土壤条件及地下水质配置了不同高抗逆性固沙植物。公路防护林的建成改变了塔里木沙漠公路沿线荒芜的生态景观，形成了独特的线状新人工生态系统。公路防护林沿线采用滴灌方式进行灌溉。其中，3 月至 5 月和 9 月至 10 月为每月 15 日和月底分别灌溉 1 次，6 月至 8 月为每月 10 日、20 日和月底分别灌溉 1 次，每次灌水 30 L m^{-2}，11 月至次年 2 月免灌[8]。由于长期采用高矿化度地下咸水灌溉，灌溉将地下水中的盐分带入土体，土壤中水分和盐分的运动迁移也日趋活跃，加之蒸发强烈，土壤盐分随着土壤水分运移至土壤表层，即在土壤表层出现了明显的盐结皮或盐分表聚现象，然而，随后的灌溉又将表层盐分淋溶至下层。因此，塔里木沙漠公路防护林土壤盐分的演变过程就是地下水和土壤水相互频繁作用的过程，即“二水”相互作用共同控制了土壤盐渍化过程。

表 1　试验区地下水最大矿化度分析结果

Table 1　Maximum mineralization of the ground water in the experimental area

样品 Sample	离子总量 The ion content(g)	HCO_3^- (g kg^{-1})	Cl^- (g kg^{-1})	SO_4^{2-} (g kg^{-1})	Ca^{2+} (g kg^{-1})	Mg^{2+} (g kg^{-1})	$K^+ + Na^+$ (g kg^{-1})	pH
地下水 Ground water	24.0	0.124	11.4	4.03	0.805	0.963	6.65	7.65

1.2　数据来源与研究方法

塔里木沙漠公路防护林建林前土壤盐分分布数据为 2002 年新疆生态与地理研究所沙漠工程课题组土壤普查资料所得。防护林建设(2005 年建成)4 a 后，于 2009 年 3 月初，即在本年度防护林未灌溉前(因为灌溉周期内土壤盐分变化比较大而且不稳定，因此选择土壤盐分相对稳定的非灌溉期)，在原有 2002 年土壤普查样地采样，用于土壤盐分分析测定。依据防护林灌溉年限、沿线地下水矿化度及地下水埋深状况，共选取 10 m × 10 m 的监测样地 40 个，取 0 ~ 40 cm 的表层土样。在每一个样地随机选取 3 个样点作为重复，在每个样点用“十”字法分别取距样点 1 m 的 4 个样品，并将 4 个样品混合作为一个土样带回实验室用于土壤盐分的分析。

将采集的土样按土壤农化分析要求，对风干过 1 mm 筛的土样按 5∶1 水土比进行浸提，用 DDA-3 型电导仪测定浸提液在 25℃ 时的电导率(EC，mS cm^{-1})。土壤浸提液的制备方法：准确称取 10.0 g 的土样置于离心管中，加入 50 ml 去 CO_2 蒸馏水，将离心管置于振荡器上振荡 10 min 后，再离心 10 min，转速 4 500 ~ 5 000 r min^{-1}，离心后上清液倒入烧杯中，并立即测量其电导率 $EC_{1:5}$、pH 和盐分离子组成。

土壤盐分离子组成测定方法：HCO_3^-，CO_3^{2-} 用双指示剂滴定法；Cl^- 用 $AgNO_3$ 滴定法；SO_4^{2-} 用 EDTA 间接滴定法；Ca^{2+}，Mg^{2+} 用 EDTA 络合滴定法；K^+，Na^+ 用火焰光度法。

研究结果分析中土壤盐渍化类型区划分及土壤盐渍化程度分级标准(表 2)见文献[9]，所用的统计特征、相关性分析等统计处理均在 SPSS13.0 中完成。

表 2　新疆盐渍化分类和分级标准

Table 2　Criteria for classification and grading of soil salinization in Xinjiang(%)

Cl^- / ($2SO_4^{2-}$)	盐渍化类型 Type of salinization	极轻盐渍化 Extreme light salinization	轻度盐渍化 Light salinization	中度盐渍化 Medium salinization	强盐渍化 Strong salinization	盐土 Salt soil
>2.00	氯化物型 Chloride	<0.15	0.15 ~ 0.30	0.30 ~ 0.50	0.50 ~ 0.80	>0.80
1.00 ~ 2.00	硫酸盐-氯化物型 Sulfate-chloride	<0.20	0.20 ~ 0.30	0.30 ~ 0.60	0.60 ~ 1.00	>1.00
0.20 ~ 1.00	氯化物-硫酸盐型 Chloride-sulfate	<0.25	0.25 ~ 0.40	0.40 ~ 0.70	0.70 ~ 1.20	>1.20
<0.20	硫酸盐型 Sulfate	<0.30	0.30 ~ 0.60	0.60 ~ 1.00	1.00 ~ 1.20	>2.00

2 结果与分析

2.1 土壤盐分变量的基本信息

以 40 个监测样地土壤剖面 0 ~ 40 cm 土壤样品的 pH(X1)、总盐(X2)、CO_3^{2-}(X3)、HCO_3^-(X4)、Cl^-(X5)、SO_4^{2-}(X6)、Ca^{2+}(X7)、Mg^{2+}(X8)、$Na^+ + K^+$(X9),以及由这些离子派生出的 $Cl^- + SO_4^{2-}/CO_3^{2-} + HCO_3^-$(X10)、$Cl^-/SO_4^{2-}$(X11)、$Na^+ + K^+/Ca^{2+} + Mg^{2+}$(X12)等 12 个基本盐分因子为变量分析。表 3 为塔里木沙漠公路防护林灌溉前后沿线土壤各盐分变量统计值。结果表明,塔里木沙漠公路沿线土壤在防护林建设前后,土壤 pH 始终维持在 8.7 左右,并未发生大的变化,依旧呈弱碱性;经过 4 a 灌溉沙漠公路沿线土壤(0 ~ 40 cm)平均含盐量从 10.42 g kg^{-1}急剧增大至 40.97 g kg^{-1},表明在防护林建成咸水灌溉后,防护林地土壤盐分表聚现象非常严重,土壤盐分在表层发生大量累积。

表 3 塔里木沙漠公路防护林建设前后沿线土壤各盐分变量统计值

Table 3 Descriptive statistics of the salt variables in the soils alongside the Tarim Desert Highway before and after the establishment of the windbreak forest belt

年份 Year		变量 Variables											
		X1 (g kg^{-1})	X2 (g kg^{-1})	X3 (g kg^{-1})	X4 (g kg^{-1})	X5 (g kg^{-1})	X6 (g kg^{-1})	X7 (g kg^{-1})	X8 (g kg^{-1})	X9 (g kg^{-1})	X10	X11	X12
2002	均值 Mean	8.71	10.42	0.01	0.15	4.06	2.41	0.39	0.40	3.00	38.49	2.11	3.61
	变异系数 CV	0.04	2.33	1.26	0.31	2.29	2.59	1.40	2.73	2.51	0.76	0.82	0.57
2009	均值 Mean	8.69	40.97	0.02	0.10	17.25	7.94	0.99	1.25	11.70	167	1.51	3.15
	变异系数 CV	0.05	1.54	1.28	0.41	1.72	1.55	0.98	1.58	1.64	1.38	0.97	0.86

注:X1 为 pH,X2 为总盐,X3 为 CO_3^{2-},X4 为 HCO_3^-,X5 为 Cl^-,X6 为 SO_4^{2-},X7 为 Ca^{2+},X8 为 Mg^{2+},X9 为 $Na^+ + K^+$,X10 为 $Cl^- + SO_4^{2-}/CO_3^{2-} + HCO_3^-$,X11 为 Cl^-/SO_4^{2-},X12 为 $Na^+ + K^+/Ca^{2+} + Mg^{2+}$ Note: X1 stands for pH; X2 for total salt; X3 for CO_3^{2-}; X4 for HCO_3^-; X5 for Cl^-; X6 for SO_4^{2-}; X7 for Ca^{2+}; X8 for Mg^{2+}; X9 for $Na^+ + K^+$; X10 for $Cl^- + SO_4^{2-}/CO_3^{2-} + HCO_3^-$; X11 for Cl^-/SO_4^{2-}; X12 for $Na^+ + K^+/Ca^{2+} + Mg^{2+}$

为了进一步明确塔里木沙漠公路在防护林建设前后土壤表层盐分差异,本研究分别对建设前后土壤盐分进行了相关性分析(表 4)。结果表明:塔里木沙漠公路防护林建设前(未灌溉前),防护林沿线土壤总盐仅仅与 Cl^-、Mg^{2+}、$Na^+ + K^+$ 呈极显著相关性(R^2 分别为 0.966、0.968 与 0.978),与 SO_4^{2-} 呈显著相关($R^2 = 0.890$),而各盐分离子间只有 Cl^- 与 CO_3^{2-}、$Na^+ + K^+$ 与 CO_3^{2-}、$Na^+ + K^+$ 与 Cl^- 和 Mg^{2+} 与 Cl^- 呈显著相关,说明公路沿线土壤盐分主要以氯盐与碳酸盐在土壤表层中聚积。而在防护林建成咸水灌溉后,由于地下水携带大量盐分进入土壤,土壤盐分组成中不仅各盐分离子含量均有所上升,而且各盐离子之间相关性也发生了改变。在阴阳离子组成中,阳离子含量 $Na^+ + K^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$,阴离子含量 $Cl^- > CO_3^{2-} > SO_4^{2-} > HCO_3^-$。在盐离子相关性方面,防护林土壤总盐与各盐分离子均呈现显著相关性,pH 与土壤总盐、Cl^-、Ca^{2+}、Mg^{2+} 均呈现负相关性,而与 HCO_3^- 呈现正相关性。表明塔里木沙漠公路防护林经过地下水灌溉后,土壤盐分形成了多元复合型盐类。

2.2 塔里木沙漠公路防护林沿线土壤盐渍化类型及特征

目前,不同地区依据当地土壤盐渍化特征状况,对于土壤盐渍化的分类标准多种多样。本文采用文献[9]《新疆农业技术手册》的土壤盐渍化类型区分表(按阴离子毫克当量百分数比值)和土壤盐渍化程度分级标准,根据表层 0 ~ 40cm 土壤盐分中 $Cl^-/(2SO_4^{2-})$ 比值及土壤含盐量进行分类和分级,并对塔里木沙漠公路沿线土壤取样剖面进行分类和级别统计。统计结果表明(表 5):塔里木沙漠公路防护林沿线土壤盐渍化主要为氯化物型与硫酸盐-氯化物型 2 种类型。其中,氯化物型占 84.2%,其主要分布于沙漠公路 k119-k423 与 k520-k552 处,处于流动沙漠区的南北两端;硫酸盐-氯化物型占 15.8%,主要分布于 k440-k520 处。从盐渍化分级标准来看,塔里木沙漠公路防护林沿线土壤均呈现不同程度的盐渍化趋势,近 81.6% 的取样点已达到中等盐渍化程度。其中,盐土及强盐渍化占 23.7%,主要分布于沙漠公路北段 k119-k180 范围内;中度盐渍化达到 57.9%,主要分布于沙漠公路南段 k368-k552 范围内;而轻度盐渍化样点仅仅占 18.4%,主要分布于沙漠公路中段 k180-k368 范围内,即地下水矿化度均较小地段。

表 4　塔里木沙漠公路防护林灌溉前后沿线土壤 0 ~ 40cm 各盐分变量相关矩阵[1)]

Table 4　Correlation matrix of soil variables in the soils(0 ~ 40cm) alongside the Tarim Desert Highway before and after the establishment of the windbreak forest belt

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
X1		-0.397*	0.433**	0.372*	-0.401*	-0.099	-0.725**	-0.457**	0.311	-0.511**	0.022	0.597**
X2	-0.443		0.456**	-0.407**	0.962**	0.450**	0.661**	0.828**	0.986**	0.911**	0.490**	0.200
X3	-0.118	0.797		-0.175	0.386*	0.382*	-0.031	0.334*	0.492**	0.288	0.278	0.597**
X4	-0.181	0.247	0.527		-0.406**	-0.152	-0.406**	-0.447**	-0.374*	-0.614**	-0.001	0.232
X5	-0.489	0.966**	0.855*	0.465		0.189	0.628**	0.723**	0.975**	0.899**	0.625**	0.239
X6	-0.305	0.890*	0.554	-0.182	0.741		0.312*	0.616**	0.359*	0.342*	-0.275	0.064
X7	-0.432	0.028	-0.341	-0.512	-0.136	0.325		0.646	0.564**	0.763**	0.279	-0.265
X8	-0.226	0.968**	0.805	0.131	0.904*	0.911*	-0.066		0.743	0.786**	0.114	-0.163
X9	-0.392	0.978**	0.855*	0.388	0.989**	0.789	-0.173	0.950**		0.879**	0.566**	0.308
X10	-0.111	0.034	0.467	0.837*	0.284	-0.411	-0.690	-0.042	0.211		0.477**	0.032
X11	0.677	-0.172	-0.657	-0.232	-0.713	-0.600	-0.386	-0.585	-0.645	-0.157		0.539
X12	-0.441	0.194	0.399	0.805	0.436	-0.260	-0.559	0.060	0.352	0.912*	-0.246	

注:1)表格内斜线左下方为防护林未建成灌溉前采样数据,右上方为防护林建成灌溉后采样数据。X1 为 pH,X2 为总盐,X3 为 CO_3^{2-},X4 为 HCO_3^-,X5 为 Cl^-,X6 为 SO_4^{2-},X7 为 Ca^{2+},X8 为 Mg^{2+},X9 为 $Na^+ + K^+$,X10 为 $Cl^- + SO_4^{2-}/CO_3^{2-} + HCO_3^-$,X11 为 Cl^-/SO_4^{2-},X12 为 $Na^+ + K^+/Ca^{2+} + Mg^{2+}$。* 表示 0.05 水平上显著,** 表示在 0.01 水平上显著 Notes:1) The data below the diagonal line are those extracted from the soil samples collected before the establishment of the windbreak forest belts, where the data above the diagonal lines of data those extracted from the soil samples collected after the establishment of the windbreak forest belts. X1 stands for pH; X2 for total salt; X3 for CO_3^{2-}; X4 for HCO_3^-; X5 for Cl^-; X6 for SO_4^{2-}; X7 for Ca^{2+}; X8 for Mg^{2+}; X9 for $Na^+ + K^+$; X10 for $Cl^- + SO_4^{2-}/CO_3^{2-} + HCO_3^-$; X11 for Cl^-/SO_4^{2-}; X12 for $Na^+ + K^+/Ca^{2+} + Mg^{2+}$. Symbol * denotes significant difference at 0.05 level and Symbol ** significant difference at 0.01 level

表 5　塔里木沙漠公路防护林沿线盐渍化分类分级统计特征

Table 5　Statistical characteristics of the classification and grading of soil salinization under the windbreak forest belts along the Tarim Desert Highway

盐渍化类型 Type of salinization	样点统计 Sample points(个)					占样点总数比例 Percentage of the total samples(%)
	极轻盐渍化 Extreme light salinization	轻盐渍化 Light salinization	中度盐渍化 Medium salinization	强盐渍化 Strong salinization	盐土 Salt soil	
氯化物型 Chloride	0	7	16	7	2	84.2
硫酸盐-氯化物型 Sulfate-chloride	0	0	6	0	0	15.8
氯化物-硫酸盐型 Chloride-sulfate	0	0	0	0	0	0
硫酸盐型 Sulfate	0	0	0	0	0	0
占样点总数比例 Percentage of the total samples(%)	0	18.4	57.9	18.4	5.3	100

2.3　塔里木沙漠公路防护林土壤盐渍化驱动力

土壤盐渍化的发生与土壤表层盐分积盐程度有关,而土壤积盐程度又主要与大气蒸发能力、土壤特性、地下水埋深和矿化度有着直接联系。塔里木沙漠公路防护林沿线土壤盐分主要来源于地下水灌溉,因此影响土壤盐分主要因素有:地下水埋深、地下水矿化度、地下水 pH、林地灌溉量、蒸发量与降雨量比值、微地貌类型、土壤母质、灌溉年限等因子。由于塔克拉玛干沙漠降雨量少,蒸发强烈,土壤绝大部分都是在经过原始成土过程而演化的风沙土,采样点也均在平坦地面上进行,而且防护林生态工程采用统一的灌溉制度。因此,影响塔里木沙漠公路防护林土壤发生盐渍化因子主要集中在地下水埋深、地下水矿化度、地下水 pH 及灌溉年限等因子上。

为了量化以上各个因子对土壤盐渍化的影响程度,将 0 ~ 40 cm 土壤平均含盐量作为母系列,而地下水埋深、地下水矿化度、地下水 pH 及灌溉年限

作为子序列,运用灰色关联分析方法研究各个因子对土壤含盐量的影响程度。结果表明:塔里木沙漠公路防护林土壤盐分高低的影响因子关联度依次为:灌溉年限(0.710 8)>地下水矿化度(0.678 1)>地下水 pH(0.673 2)>地下水埋深(0.650 9)。这表明,在近几年塔里木沙漠公路防护林土壤盐分演变过程中,灌溉年限为塔里木沙漠公路防护林盐分变化的主导驱动因子,而地下水矿化度、地下水 pH 及地下水埋深则是盐分空间上变异的控制因素。

3 结论与讨论

塔里木沙漠公路防护林在建成前与建成 4 a 后,土壤盐分离子含量发生了显著分异。塔里木沙漠公路防护林建成后,土壤盐分各离子含量较建成前显著增加。其中,阳离子含量 $Na^+ + K^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$,阴离子含量 $Cl^- > CO_3^{2-} > SO_4^{2-} > HCO_3^-$。

塔里木沙漠公路防护林沿线土壤盐渍化类型以氯化物型与硫酸盐-氯化物型为主,分别占到监测点的 84.2% 与 15.8%;防护林沿线土壤均呈现不同程度的盐渍化趋势,有近 81.6% 的取样点已达到中度盐渍化程度。其中,盐土及强盐渍化占 23.7%,中度盐渍化达到 57.9%,而轻度盐渍化样点占 18.4%。

灰色关联性分析表明,灌溉年限是塔里木沙漠公路防护林盐分变化的主导驱动因子,而地下水矿化度、地下水 pH 及地下水埋深则是盐分空间变异的控制因素。

从现有的研究分析,尽管利用咸水灌溉建设防护林生态工程取得成功,防护林土壤盐分的累积也仅仅发生在土壤表层,即盐结皮层[10],而盐结皮层下层土壤及植物根系范围内(盐结皮下 0 ~ 200 cm)土壤脱盐明显,因此也不会对植物生长发育造成影响[11]。但是,为了防止次生盐渍化发生,引用低矿化度地下水灌溉和降低防护林灌溉量是防止土壤盐渍化的最有效的方法。因此,节水灌溉和防止土壤盐渍化仍然是塔里木沙漠公路防护林能否可持续的关键问题。

参 考 文 献

[1] Zhou S W, Zhang G Y, Zhang X. Exchange reaction between selenite and hydroxylion of variable charge soil surfaces I. Electrolyte species and pH effects. Pedosphere. 2003, 13(3): 227—232

[2] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望. 土壤学报, 2008, 45(5): 838—845. Yang J S. Developmengt and prospect of the research on salt-affected soils in China(In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 838—845

[3] Wu J Q, Zhang R D, Yang J Z,. Estimating infiltration recharge using a response function model. Journal of Hydrology, 1997, 198: 124—139

[4] 王遵亲,祝寿泉,俞仁培,等. 中国盐渍土. 北京:科学出版社, 1993: 5—515. Wang Z Q, Zhu S Q, Yu R P, et al. Salt-affected soils of China(In Chinese). Beijing: Science Press, 1993: 5—515

[5] 田长彦, 周宏飞, 刘国庆. 21 世纪新疆土壤盐渍化调控与农业持续发展研究建议. 干旱区地理, 2000, 23(2): 177—181. Tian C Y, Zhou H F, Liu G Q. The prorosal on control of soil salinizing and agricultural sustaining development in 21'S century in xinjiang(In Chinese). Arid Land Geography, 2000, 23(2): 177—181

[6] 何祺胜, 塔西甫拉提·特依拜, 丁建丽, 等. 塔里木盆地北缘盐渍地遥感调查及成因分析—以渭干河-库车河三角洲绿洲为例. 自然灾害学报, 2007, 16(5): 24—29. He Q S, Tashpolat Tiyip, Ding J L. Remote sensing investigation and cause analysis of saline soils in north of Tarim Basin: Taking delta oasis of Weigan and Kuqa rivers for example(In Chinese). Journal of Natural Disasters, 2007, 16(5): 24—29

[7] 任加国, 郑西来, 许模, 等. 新疆叶尔羌河流域土壤盐渍化特征研究. 土壤, 2005, 37(6): 635—639. Ren J G, Zheng X L, Xu M, et al. Salinization characteristics of the soil in yeerqiang river valley, xinjiang(In Chinese). Soils, 2005, 37(6): 635—639

[8] 姚荣江, 杨劲松. 黄河三角洲地区浅层地下水与耕层土壤积盐空间分异规律定量分析. 农业工程学报, 2007, 23(8): 45—51. Yao R J, Yang J S. Quantitative analysis of spatial distribution pattern of soil salt accumulation in plough layer and shallow groundwater in the Yellow River Delta (In Chinese). Transactions of the CSAE, 2007, 23(8): 45—51

[9] 新疆农业科学院. 新疆农业技术手册. 乌鲁木齐:新疆人民出版社, 1976: 1—780. Xinjiang Academy of Agricultural Sciences. Xinjiang agricultural manuals(In Chinese). Urumgi: Xinjiang People's Publishing House, 1976: 1—780

[10] 王永东, 徐新文, 雷加强, 等. 塔里木沙漠公路生态防护林沿线土壤表层盐分特征. 干旱区研究, 2010, 27(1): 51—56. Wang Y D, Xu X W, Lei J Q, et al. Analysis on properties of topsoil salinity along the shelterforest belts of the Tarim desert highway (In Chinese). Arid Zone Research, 2010, 27(1): 51—56

[11] 周智彬, 徐新文, 雷加强, 等. 咸水灌溉下塔里木沙漠公路防护林盐分平衡及盐分运移. 干旱区地理, 2006, 29(4): 470—475. Zhou Z B, Xu X W, Lei J Q, et al. Salt balance and movement of Tarim desert highway shelterbelt irrigated by saline water (In Chinese). Arid Land Geography, 2006, 29(4): 470—475

SOIL SALINIZATION OF THE WINDBREAK FOREST BELTS IRRIGATED WITH SALINE WATER ALONGSIDE THE TARIM DESERT HIGHWAY

Wang Yongdong[1]　Li Shengyu[1]　Xu Xinwen[1†]　Lei Jiaqiang[1]　Jin Xiaojun[1,2,3]　Yan Jian[3]　Wang Qiang[3]
Di Kun[3]　Peng Huiqing[3]

(1 *Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi* 830011, *China*)

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

(3 *Tarim Branch, PetroChina Company Limited, Kurle, Xinjiang* 841000, *China*)

Abstract　Soil salinization is one of the primary environmental problems, which affects sustainable development of the windbreak forest belts alongside the Tarim Desert Highway. In order to study soil salinization caused by irrigation with saline water of the windbreak forest belts along the Highway since their establishment, distribution of soil salts under the forest belts was investigated. By utilizing the data collected during the soil salt survey before the establishment of the forest belts, the methods of statistical analysis, correlation analysis and grey relational analysis were adopted in the primary study of soil salt ions, status quo of soil salinization and its driving force in the 40 monitoring posts distributed alongside the highway. Results show that after the establishment of the windbreak forest belts, the contents of various salt ions increased significantly in the soil, with cations showing a decreasing order of $Na^+ + K^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$ in content and anions one of $Cl^- > CO_3^{2-} > SO_4^{2-} > HCO_3^-$. Soil salinization in the forest belts was dominated by Chloride and Sulfate-chloride, which accounted for 84.2% and 15.8%, respectively, of the monitoring posts. About 81.6% of the monitoring posts reported moderate soil salinization. The grey relational analysis reveals that irrigation history is the major driving force of soil salinization in the forest belts and is then followed by mineralization, pH and water table of the ground water.

Key words　Tarim Desert Highway; Windbreak forest belts; Saline water irrigation; Soil salinization