试验研究

河水漫溢干扰对土壤盐分的影响
——以塔里木河下游为例

徐海量，张 沛，赵新风，张 鹏，凌红波
（中国科学院 新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐 830011）

摘 要：[目的] 探索漫溢后出现明显的植被群落变化的原因和不同漫溢方式对表层土壤盐分的影响，为塔里木河下游植被恢复和人工植被的重建提供理论依据。[方法] 利用土壤溶液电导率法测定塔里木河下游漫溢区和非漫溢区 399 个表层土壤样品中盐分含量，探讨不同漫溢干扰方式对土壤盐分的影响。[结果] 塔里木河下游土壤的含盐量较高，但在漫溢干扰后土壤表层盐分均出现明显的下降；漫溢方式对土壤盐分的影响显著，表现为漫溢前的土壤总盐含量与多次漫溢后差异达极显著，与少次漫溢和冲刷差异显著，与长期渍水差异不显著。[结论] 漫溢干扰后土壤表层盐分有所降低是植被发生明显变化的原因，其中中等频次和持续时间的漫溢干扰更有利于表层土壤盐分的淋洗和植被的恢复。

关键词：漫溢干扰；土壤盐分；塔里木河下游
文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2016)05-0001-06 **中图分类号**：Q948.15，Q948.11

文献参数：徐海量，张沛，赵新风，等. 河水漫溢干扰对土壤盐分的影响[J]. 水土保持通报，2016，36(5)：001-006. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2016.05.008

Effect of River-flooding on Soil Salinity in Lower Reaches of Tarim River

XU Hailiang, ZHANG Pei, ZHAO Xinfeng, ZHANG Peng, LING Hongbo
(*Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang Uygur Autonomous Region* 830011, *China*)

Abstract: [Objective] The objective of the study is to explain changes in natural vegetation communities after flooding and explore the impacts of different flooding modes on surface soil salinity and to provide the theoretical basis for vegetation restoration and reconstruction of artificial vegetation in lower reaches of Tarim river. [Methods] Based on the long-term field investigation, this paper measured the salt content of 399 surface soil samples collected from water flooding area and non-water flooding area with electric conductivity method, and discussed the effects of different flooding disturbances on salt content in surface soil. [Results] The total soil salt contents in the lower reaches of Tarim river were generally higher, which affected the distribution and growth of nature vegetation, but after flooding disturbance, the salinity of surface soil declined significantly. The results of ANOVA analysis about soil salinity of surface soil under different flooding modes showed that the effect of higher frequency on the total soil salt contents were more significant than lower frequency, but long-term submerge was disadvantageous for soil desalination, so the effect of flooding mode for soil salinity were significant. [Conclusion] The natural vegetation community varied after flooding for the decline of salinity in surface soil, and flooding disturbance with intermediate frequency and duration was beneficial for the ecology restoration in the lower reaches of the Tarim river.

Keywords: **flooding disturbance; soil salinity; lower reaches of the Tarim river.**

生态恢复是国际上研究的热点，采取何种措施实现恢复是问题的核心所在，因此，国内外开展了诸多研究[1-6]。有计划的控制和利用河水漫溢已经是河流退化生态系统恢复和重建的重要手段，河水漫溢在维

收稿日期：2015-11-17 **修回日期**：2015-12-22
资助项目：国家自然科学基金项目“塔里木河下游输水工程生态变化的量化研究及价值评估”(31370551)，“干旱区典型流域人工与天然绿洲面积转化过程与适宜比例”(31400466)，“塔里木河绿洲适宜配比及水量调控”(41471099)，“漫溢干扰对植被群落动态及主要建群植物种群分布格局的影响”(41171427)
第一作者：徐海量(1971—)，男(汉族)，江苏省宝应县人，博士，研究员，主要从事生态水文学、恢复生态学方向研究。E-mail：xuhl@ms.xjb.ac.cn。

系干旱河盆的植物区系构成和结构的空间异质性方面有着重要的作用[7-9]。在国内,王正文等[10-12]研究了松嫩平原不同水淹干扰梯度下草本植物的种间关系、种群分布格局、植物功能群的组成及多样性特征;陈亚宁等和徐海量等[13-17]研究了生态输水后塔里木河下游植被恢复的生态的特征以及植被和地下水的相互关系。这些研究都已证明漫溢干扰对于植被恢复的影响十分显著,但是具体到河水漫溢过程中植物群落响应的机理研究并不多见,而类似塔里木河下游这样土壤盐渍化十分严重的地区在漫溢干扰后植被出现明显变化的原因是我们关注的焦点。本文试图从漫溢对土壤盐分影响的角度,来回答2个问题:① 漫溢后出现明显的植被变化的原因是什么?②漫溢方式、频次和持续时间是如何影响土壤表层盐分的?通过对塔里木河下游地区不同盐生植物出现的频次和土壤盐分变化的关系,试图为塔里木河下游植被恢复和人工植被的重建提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于塔里木河下游,地理坐标为39°24′08″—41°03′40″N,86°37′23″—88°30′00″E,自20世纪70年代以来,随着人类大规模的水土开发活动,塔里木河下游出现严重的生态退化问题,主要表现在植被的衰退、土地的沙化和河湖的干涸。为此,于2000年实施了生态输水工程,由于过水水量和过水时间的差异,在塔里木河下游不同河段均发生了河道决口,从而出现了较大范围的河水漫溢现象。生态输水的水量、流程和次数在塔里木河下游不同河段造成的漫溢方式、强度和频次都不尽相同。其中在大西海子附近由于水量大,造成漫溢区面积很大,积水时间长;在喀尔达依附近由于河道决口,出现了1～2次大范围的河水漫溢现象;在阿拉干附近,由于到此的河水流量小,仅在河流的阶地上出现漫溢,主要还是表现为河水的多次冲刷现象,而下游下段随着水量的减少基本没有较大面积的漫溢区出现;而河流的尾闾区台特玛湖,由于地形平坦,水流汇集于此,漫溢的时间相对较长而漫溢区的范围则比较大。在河水漫溢的区域地表植被的种类和数量远远高于非漫溢区;在塔里木河下游尾闾的台特玛湖附近,由于地形平缓,坡度只有1/12 199是下游最平缓的区段,造成输水后积水面积巨大,但是水深很浅,一般不到1 m深,在多数区域受强烈蒸发的影响造成湖水的积水时间很短,一般1～2个月湖水面积就缩减80%以上。这些湖水消退的地方常出现大量茂密的植被,与没有受到漫溢干扰的区域地表寸草不生的情况形成了鲜明的对比。这也就是我们开展河水漫溢干扰研究的出发点,同时,不同河段漫溢持续时间、频次和强度的差异也为我们提供了不同方式漫溢干扰研究的理想场地。

2 研究方法

2.1 样品采集

于2007至2014年间,对塔里木河下游河道两侧10 km范围内每隔5 km采集土壤表层0—5 cm的土样,共采集土样399个,分别测定电导,了解塔里木河下游土壤盐分的空间分布特点。另外,又在塔里木河下游7个断面和5个闸口取受河水漫溢影响及未受河水漫溢影响的土壤样品。采样分为2种:(1)在闸口附近未放水前采集土壤样品,然后在闸口放水后同样地点处再采集漫溢后的土壤样品,二者进行对照;(2)在已受河水跑水造成的漫溢区内,选漫溢样点和非漫溢样点各3个,二者的间距一般小于20 m以尽量保证二者土壤母质基本一致。以上每个取样点分别取10 cm×10 cm深度为0—40 cm的土壤样品3个,将样品带回实验室进行室内分析。

2.2 植被调查

(1)漫溢区样地设置。在每个断面随机选择30个2 m×2 m的小样方,根据漫溢次数进行植被调查,记录每种植物的个体数、盖度、胸径、基径、高度、冠幅、频度等指标,并计算多样性指数。

(2)非漫溢区域样地设置。样方垂直河道并对应相应的漫溢小样方,样方设置40 m×60 m。植被调查内容同上。

2.3 试验处理

根据野外长期观测的水文记录,按照不同的漫溢时间、漫溢频次及距离大西海子水库不同的距离进行取样,为文中讨论方便,具体的处理方法分级见表1。

表1 不同漫溢处理试验分级标准

处理方法	漫溢多次	漫溢少次	冲刷	渍水
漫溢持续时间/(d·a^{-1})	30～50	10～20	5～10	70～90
漫溢频次/(次·a^{-1})	3～5	1～2	10～15	≥1

3 结果与分析

3.1 河水漫溢区与非漫溢区土壤盐分的变化

河水漫溢对研究区的表层是洗盐和淋溶的过程,从图1可以看出,土壤表层漫溢区的电导率和全盐量均小于非漫溢区,漫溢区和非漫溢区差别很大,说明漫溢降低了土壤表层盐分的含量,特别是表层土壤的盐分。

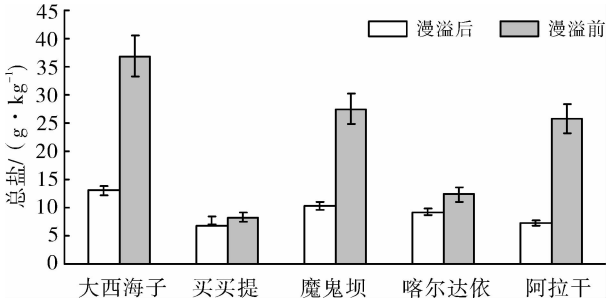


图 1　漫溢前后土壤总盐的变化

在塔里木河下游不同区域因漫溢方式的差异造成漫溢后土壤盐分变化的幅度不尽相同,例如:大西海子水库附近,漫溢后土壤总盐分降低了 65%,阿拉干降低了 72%,降低幅度相对较少的是买买提和喀尔达依附近,分别降低了 19%和 26%。

表 2　漫溢与否对土壤盐分影响的显著性检验

土壤全盐	平方和	自由度	均方	F 值	显著性
组间	89.627	1	89.627	8.294	0.006
组内	583.539	54	10.806		
合计	673.166	55			

如表 2 所示,漫溢与否对土壤盐分影响的显著性检验结果显示,漫溢对土壤的影响是极显著的(F=8.294,p=0.006)。在荒漠生态系统中,水是影响土壤养分、盐分循环的关键因素,在降雨少的干旱荒漠区,地表水对土壤表层土壤的冲刷与沉降作用是造成这种漫溢前后土壤盐分显著变化的原因之一[18-22]。

3.2　漫溢对不同深度土壤盐分的影响

土壤盐分在不同的深度上有差异,土壤深度不同,受漫溢影响的程度也不同。漫溢对土壤表层盐分的淋洗作用是比较明显的(图 2),尤其 0—10 cm 的土层盐分向下淋溶的最显著,漫溢后土壤 0—10 cm 的土层的总盐含量的平均值小于 8 g/kg,较漫溢前平均降低 48%。

荒漠植物的种子大多数分布在 0—10 cm 的土层,此土层土壤盐分的降低对种子萌发和定植是非常有益的。漫溢后,0—40 cm 土层的盐分较漫溢前变的较均匀,各层盐分平均值分别降低了 48%,30%,10%,22%,表明漫溢干扰对各层土壤的盐分均有一个淋洗作用。

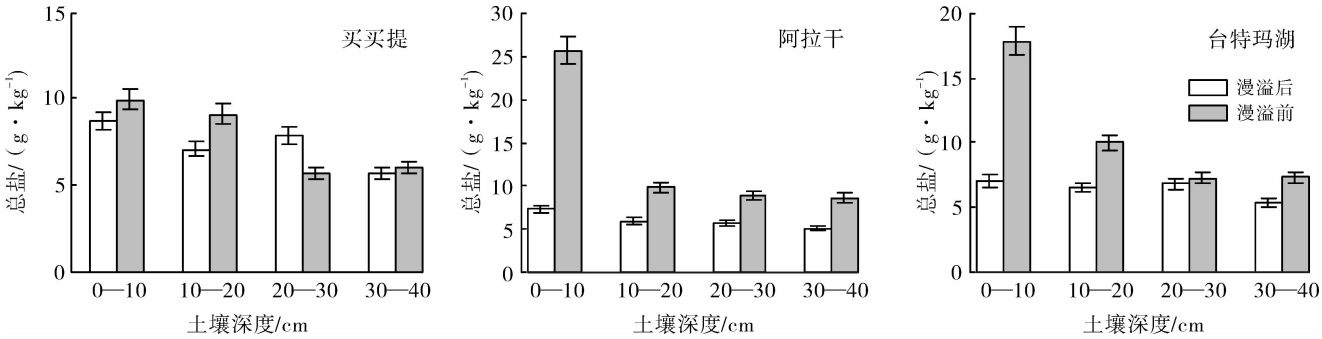
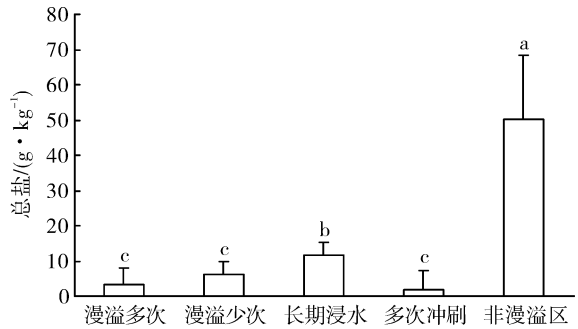


图 2　漫溢前后土壤不同深度盐分的变化

3.3　漫溢方式对盐分的影响

不同的漫溢方式造成地表过水的时间、强度都有所不同,从图 3 看可以看出,与非漫溢区相比,不同漫溢方式对土壤总盐的影响都是显著的,并且不同的漫溢方式对土壤表层盐分的影响也是不同的,显著性检验的结果(表 3)显示漫溢方式对土壤盐分的影响总体是显著的(F=3.195,p=0.02)。但是少次漫溢和多次漫溢及多次冲刷之间差异不显著,这说明漫溢 1～2次就可大幅降低土壤表层的盐分,而更多次的漫溢甚至冲刷对土壤盐分的改变已经不明显了。而长期渍水区土壤盐分反而很高,这与地表长期渍水后地下水大幅抬升,盐分淋溶后又在强烈的蒸发作用下,土壤表层再次积盐有关。



注:不同小写字母表示 0.05 水平下的差异显著性。

图 3　不同漫溢方式对土壤总盐的影响

3.4　漫溢持续时间和频次对土壤盐分的影响

盐随水来,盐随水去。土壤盐渍化受区域性因素的制约和影响,其积盐、脱盐过程存在差异。大西海

子水库附近和台特玛湖附近表层土壤盐分都较高。从漫溢持续的时间来看，漫溢在大西海子持续的时间小于台特玛湖的时间。漫溢后大西海子水库附近土壤总盐分降低了 65%，土壤表层洗盐过程明显；而台特玛湖地势较低，生态输水后，曾形成一片湖面，形成长期渍水，土壤表层虽然有洗盐过程，但随地下水的抬升，又有返盐现象，土壤脱盐效果较漫溢前差异并不显著，因此漫溢持续时间并不是越长越好。

与非漫溢区相比，多次漫溢对土壤盐分表层的洗盐作用十分明显(表 4)，少次漫溢和冲刷对土壤盐分的影响也达到了显著性水平。闸口附近漫溢方式对土壤的作用主要是冲刷，虽然频次多，但从每次冲刷后土壤盐分降低的幅度看，则呈现逐渐递减的趋势，所以虽然多次冲刷后土壤表层盐分最低，但考虑到水资源的宝贵及降低土壤盐分的最终的效果看，也不适宜太多。

表 3 不同漫溢方式下土壤全盐含量差异的显著性检验(LSD)

漫溢方式		均差	标准差	显著性	95%置信区间	
					下限	上限
少次	多次	0.196 1	0.221 42	0.382	−0.253 9	0.646 1
	浸水	−1.126 1*	0.266 12	0.000	−1.666 9	−0.585 3
	冲刷	0.362 9	0.308 76	0.248	−0.264 6	0.990 3
多次	少次	−0.196 1	0.221 42	0.382	−0.646 1	0.253 9
	浸水	−1.322 2*	0.208 76	0.000	−1.746 5	−0.898 0
	冲刷	0.166 8	0.260 95	0.527	−0.363 5	0.697 1
浸水	少次	1.126 1*	0.266 12	0.000	0.585 3	1.666 9
	多次	1.322 2*	0.208 76	0.000	0.898 0	1.746 5
	冲刷	1.489 0*	0.299 81	0.000	0.879 7	2.098 3
冲刷	少次	−0.362 9	0.308 76	0.248	−0.990 3	0.264 6
	多次	−0.166 8	0.260 95	0.527	−0.697 1	0.363 5
	浸水	−1.489 0*	0.299 81	0.000	−2.098 3	−0.879 7

注：* 表示差异显著($p<0.05$)。

表 4 不同漫溢方式—非漫溢对土壤全盐含量影响的显著性检验

漫溢方式	均差	标准差	t	sig.	95%置信区间	
					下限	上限
少次	3.412 0*	1.513 81	−2.254	0.029	0.372 9	6.451 1
多次	3.608 1*	1.031 49	−3.498	0.001	1.537 3	5.678 9
浸水	2.285 9	1.430 42	−1.598	0.116	−0.585 8	5.157 6
冲刷	3.774 9*	1.775 10	−2.127	0.038	0.211 2	7.338 5

4 讨论与结论

4.1 讨 论

4.1.1 *塔里木河下游土壤盐分空间分布特点* 许多的研究都已阐明，塔里木河下游生态输水后，特别是漫溢后植被的种类和长势发生了明显的变化，例如徐海量等[16]的研究发现，漫溢后植物物种数由输水前的 19 种增加到输水后的 37 种，而植物的长势也是漫溢区优于非漫溢区，那么出现如此明显植被变化的原因是什么呢？

从塔里木河下游采集的 399 个土壤样品的电导值看，最大值 39.76 mS/cm，均值为 6.513 1 mS/cm，土壤浸出液小于 8 mS/cm 的取样点占总取样数的 71.4%；大于 8 mS/cm，小于 16 mS/cm 的取样点占总取样数的 19%；而大于 16 mS/cm 的取样点占总取样数的 9.5%，因此，塔里木河下游土壤总体上属于重盐土类型。

从土壤盐分的空间分布看(图 4)，在距离大西海子水库 378 km 的范围内，表层土壤盐分空间分布的总趋势表现为：从河流纵向上为“两头高，中间低”，即大西海子水库和台特玛湖附近表层土壤盐分较高，电导值一般在 15 mS/cm 以上。这些数据表明，塔里木河下游植被种类稀少的原因很可能是表层土壤的盐分太重，造成很多不耐盐植物的种子无法萌发和繁衍，而漫溢后由于表层土壤盐分的大幅度降低，种子萌发的环境得以明显改善。

4.1.2 *漫溢对盐分淋洗的作用和植被反应* 图1—2 已经显示，漫溢干扰方式的差异对于土壤表层盐分的

影响是非常明显的,但是在今后塔里木河流域治理工程中我们如何利用这些研究成果实现最大效益的生态恢复是研究的出发点,而仅仅看土壤的盐分变化是不够,为此我们将不同漫溢方式下地表植被的生物多样性指数的变化与土壤盐分的变化进行对比(图 5)。

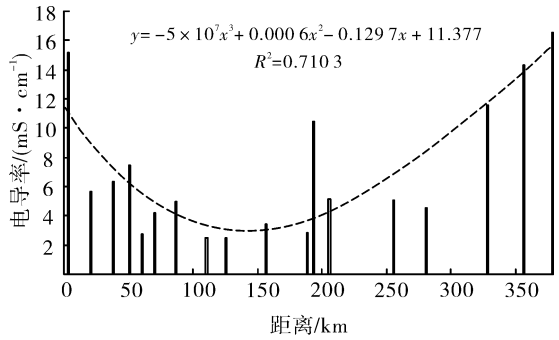


图 4　塔里木河下游表层土壤电导空间分布

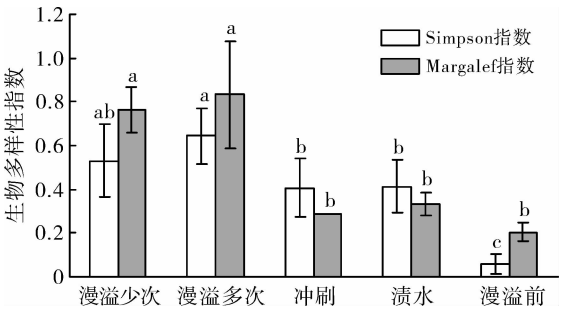


图 5　不同漫溢频次下生物多样性指数的变化

从图 5 可以看出,漫溢后植被的多样性指数均有明显的增加。例如,漫溢少次和漫溢多次的生物多样性指数均较输水前提高了 760%,270% 和 950%,310%。我们更关注的是不同漫溢方式下植被多样性的变化,而图 5 显示了一个很有意思的现象,漫溢多次的多样性指数最高,其次是漫溢少次,但是它们之间有差异不显著。

冲刷区和渍水区植物多样性指数则大幅度偏低,这与土壤盐分的变化表现为不同的规律。图 3 上显示,冲刷区土壤表层的淋洗效果最好,而渍水区表层会出现再次的积盐,为此我们又进行了进一步的调查,发现在冲刷区只有胡杨(*Populus euphratica*)、柽柳(*Tamarix* spp)、骆驼刺(*Alhagi spasifolia*)等深根的植物,而 1 年生草本和多年浅根植物均未出现,表明过多的强烈的冲刷将浅根植物冲走,造成它们无法存活,而在渍水区则只有耐盐能力突出的盐节木、盐穗木和芦苇等植物存活,这说明盐分较重限制了生物多样性的恢复。以上结果如果与著名的"中度干扰"假说相结合则能够说明问题:过多的漫溢频次和过长的漫溢持续时间并不适宜植物多样性的恢复,一个适度的洪水干扰对于塔里木河下游的生态恢复最为有利。同时以上是对"中度干扰"假说在干旱区荒漠河岸林地区有力的验证,将湿润地区的这一理论在干旱半干旱地区进行丰富和补充。

4.2　结论

(1) 塔里木河下游土壤的含盐量较高,总体上属重盐土类型。塔里木河下游生态输水造成塔里木河下游漫溢区与非漫溢区土壤表层盐分差异显著。漫溢对表层土壤盐分(0—40 cm)的淋洗作用在不同的深度上有差异,漫溢干扰对各层土壤的盐分均有淋洗作用,随土壤深度不同,受漫溢影响的程度也不同,如:0—10 cm 的土层盐分向下淋溶的最显著,而荒漠植物的种子也多分布在这个深度的土层,土壤盐分的降低,使得种子萌发的环境明显改善,这有可能是漫溢区出现较多实生苗的原因。

(2) 漫溢干扰方式的差异对于土壤表层盐分的影响是非常明显,受河水漫溢的频次、持续时间、冲刷强度等干扰,土壤表层盐分的积盐、脱盐过程存在差异。通过不同漫溢方式下地表植被的生物多样性指数的变化与土壤盐分的变化进行对比,漫溢后,土壤表层盐分的变化影响着地表植被的分布,土壤盐分较重限制了生物多样性的恢复。

(3) 塔里木河下游生态输水有效地改善了漫溢区植被的生存条件,通过漫溢频次、漫溢持续时间及漫溢强度对土壤盐分影响的效果分析,揭示过多的漫溢频次和过长的漫溢持续时间并不适宜植物多样性的恢复。因此,为节约干旱区宝贵的水资源,只有适度的洪水干扰对塔里木河下游的生态恢复最为有利。

[参 考 文 献]

[1] Goodwin C N, Hawkins C P, Kershner J L. Riparian restoration in the Western United States: Overview and perspective[J]. Restoration Ecology, 1997, 5(S4): 4-14.

[2] Vecrin M P, Grevilliot F, Muller S. The contribution of persistent soil seed banks and flooding to the restoration of alluvial meadows[J]. Journal for Nature Conservation, 2007,15(1):59-69

[3] Menges E S, Waller D M. Plant Strategies in Relation to Elevation and Light in Floodplain Herbs[J]. American Naturalist, 1983,122(4):454-473.

[4] Bissels S, Holzel N, Donath T W, et al. Evaluation of restoration success in alluvial grasslands under contrasting flooding regimes [J]. Biological Conservation, 2004,118(5):641-650.

[5] Capon S J. Flood variability and spatial variation in

plant community composition and structure on a large arid floodplain [J]. Journal of Arid Environments, 2005,60(2):283-302.

[6] Gourley, C R. Restoration of the lower Truckee River ecosystem: Challenges and opportunities[J]. Journal of Land, Resources & Environmental Law, 1998(18): 113-121.

[7] Jansson R. Effects of river regulation on river-margin vegetation: A comparison of eight boreal rivers[J]. Ecological Applications, 2000,10(1):203-224.

[8] Katz G L, Friedman J M, Beatty A S W. Delayed effects of flood control on a flood-dependent riparian forest[J]. Ecological Applications, 2005,15(3):1019-1035.

[9] Jansson R, Zinko U, Mettitt D M, et al. Hydrochory increases riparian plant species richness: A comparison between a free-flowing and a regulated river[J]. Journal of Ecology, 2005,93(6):1094-1103.

[10] 王正文,邢福,祝廷成,等.松嫩平原羊草草地植物功能群组成及多样性特征对水淹干扰的响应[J].植物生态学报,2002,26(6):708-716.

[11] 王正文,祝廷成.水淹干扰对羊草草地地上生物量影响的初步研究[J].应用生态学报,2003,4(12):2162-2166.

[12] 王正文,祝廷成.松嫩草原主要草本植物的生态位关系及其对水淹干扰的响应[J].草业学报,2004,13(3):27-33.

[13] 陈亚宁,李卫红,陈亚鹏,等.新疆塔里木河下游柽柳。芦苇对生态输水的响应[J].冰川冻土,2004,26(5):595-601.

[14] Chen Yaning, Zhang Xiaolei, Zhu Xiangmin, et al. Analysis on the ecological benefits of the stream water conveyance to the dried-up river of the lower reaches of Tarim River, China[J]. Science in China(Series D), 2004,47(11):1053-1064.

[15] 陈亚宁,李卫红,徐海量,等.塔里木河下游地下水位对植被的影响[J].地理学报,2003,58(4) 542-549.

[16] 徐海量,叶茂,李吉玫,等.河水漫溢对荒漠河岸林植物群落生态特征的影响[J].生态学报,2007,27(12):4990-4998.

[17] 徐海量,陈亚宁,杨戈.塔里木河下游生态输水对植被和地下水位的影响[J].环境科学,2003,24(4):18-22.

[18] 杨玉海,陈亚宁,李卫红.新疆塔里木河下游土壤特性及其对物种多样性的影响[J].生态学报,2008,28(2):602-611.

[19] Abrams M M, Jacobson P J, Jacobson K M, et al. Survey of soil chemical properties across a landscape in the Namib Desert[J]. Journal of Arid Environments, 1997,35(1):29-38.

[20] Jacobson P J, Cherry D S. Transport, retention, and ecological significance of woody debris within a large ephemeral river[J]. Journal of the North American Benthological Society, 1999,18(4):429-444.

[21] Smith R M H, Mason T R, Ward J D. Flash-flood sediments and ichnofacies of the Late Pleistocene Homeb Silts, Kuiseb River, Namibia[J]. Sedimentary Geology, 1993,85(1/4):579-599.

[22] Shafroth P B, Beauchamp V B, Briggs M K, et al. Planning Riparian Restoration in the Context of Tamarix Control in Western North America[J]. Restoration Ecology, 2008,16(1):97-112.