

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

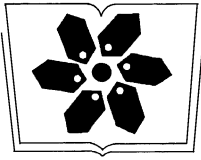
Acta Ecologica Sinica



第32卷 第5期 Vol.32 No.5 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 5 期 2012 年 3 月 (半月刊)

目 次

淀山湖富营养化过程的统计学特征	程 曦, 李小平, 陈小华 (1355)
拟水狼蛛对食物中镉的吸收和排泄及生物学响应	张征田, 张光铎, 张虎成, 等 (1363)
接种后共培养时间对丛枝菌根喜树幼苗喜树碱含量的影响	于 洋, 于 涛, 王 洋, 等 (1370)
沙尘暴发生日数与空气湿度和植物物候的关系——以民勤荒漠区为例	常兆丰, 王耀琳, 韩福贵, 等 (1378)
西藏牦牛 mtDNA D-loop 区的遗传多样性及其遗传分化	张成福, 徐利娟, 姬秋梅, 等 (1387)
红松阔叶混交林林隙土壤水分分布格局的地统计学分析	李 猛, 段文标, 陈立新, 等 (1396)
黄土丘陵区子午岭不同植物群落下土壤氮素及相关酶活性的特征	邢肖毅, 黄懿梅, 黄海波, 等 (1403)
毛竹高速生长期土壤碳氮动态及其微生物特性	王雪芹, 张奇春, 姚槐应 (1412)
长期 N 添加对典型草原几个物种叶片性状的影响	黄菊莹, 余海龙, 袁志友, 等 (1419)
接种 AMF 对菌根植物和非菌根植物竞争的影响	张宇亭, 王文华, 申 鸿, 等 (1428)
福州大叶榕隐头果内的小蜂群落结构与多样性	吴文珊, 陈友铃, 蔡美满, 等 (1436)
不同生境朝鲜淫羊藿生长与光合特征	张永刚, 韩 梅, 韩忠明, 等 (1442)
基于日均温度的华山松径向生长敏感温度研究	封晓辉, 程瑞梅, 肖文发, 等 (1450)
长江三峡库区蝶类群落的等级多样性指数	马 琦, 李爱民, 邓合黎 (1458)
甜瓜幼苗叶片光合变化特性	韩瑞锋, 李建明, 胡晓辉, 等 (1471)
双季稻田种植不同冬季作物对甲烷和氧化亚氮排放的影响	唐海明, 肖小平, 帅细强, 等 (1481)
古尔班通古特沙漠西部地下水位和水质变化对植被的影响	曾晓玲, 刘 彤, 张卫宾, 等 (1490)
流溪河水库颗粒有机物及浮游动物碳、氮稳定同位素特征	宁加佳, 刘 辉, 古滨河, 等 (1502)
采用本土蔬菜种子替代水藓评价污泥有机肥腐熟度	刘颂颂, 许田芬, 吴启堂, 等 (1510)
人为营养物质输入对汉丰湖不同营养级生物的影响——稳定 C、N 同位素分析	李 斌, 王志坚, 金 丽, 等 (1519)
流沙湾海草床海域浮游植物的时空分布及其影响因素	张才学, 陈慧妍, 孙省利, 等 (1527)
福寿螺的过冷却研究	赵本良, 章家恩, 罗明珠, 等 (1538)
水稻生育期对褐飞虱和白背飞虱卵巢发育及起飞行为的影响	陈 宇, 傅 强, 赖凤香, 等 (1546)
绿盲蝽越冬卵的耐寒能力	卓德干, 李照会, 门兴元, 等 (1553)
陆桥岛屿环境下社鼠种群数量的估算方法	张 旭, 鲍毅新, 刘 军, 等 (1562)
北京市居民食物消费碳足迹	吴 燕, 王效科, 逯 非 (1570)
社会经济系统磷物质流分析——以安徽省含山县为例	傅银银, 袁增伟, 武慧君, 等 (1578)
内陆河流域试验拍卖水权定价影响因素——以黑河流域甘州区为例	邓晓红, 徐中民 (1587)
专论与综述	
台风对森林的影响	刘 斌, 潘 澜, 薛 立 (1596)
海洋酸化对珊瑚礁生态系统的影响研究进展	张成龙, 黄 晖, 黄良民, 等 (1606)
三种外来入侵斑潜蝇种间竞争研究进展	相君成, 雷仲仁, 王海鸿, 等 (1616)
沉积物生源要素对水体生态环境变化的指示意义	于 宇, 宋金明, 李学刚, 等 (1623)
异化 Fe(III) 还原微生物研究进展	黎慧娟, 彭静静 (1633)
问题讨论	
锡林郭勒盟生态脆弱性	徐广才, 康慕谊, Marc Metzger, 等 (1643)
研究简报	
哥斯达黎加外海夏季表层浮游动物种类组成及分布	刘必林, 陈新军, 贾 涛, 等 (1654)



封面图说: 气候变暖下的北极冰盖——自从 1978 年人类对北极冰盖进行遥感监测以来, 北极冰正以平均每年 8.5% 的速度持续缩小, 每年 1500 亿吨的速度在融化。这使科学家相信, 冰盖缩小的根本原因是全球变暖。北极的冰盖消失, 让更大面积的深色海水暴露出来, 使海水吸收更多太阳热辐射反过来又加剧冰盖融化。由于北极冰的加速融化, 北冰洋的通航已经成为 21 世纪初全球最重要的自然地理事件和生态事件。从这张航片可以看到北极冰缘正在消融、开裂崩塌的现状。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201101250125

曾晓玲, 刘彤, 张卫宾, 孙钦明, 沈雪莹, 司朗明. 古尔班通古特沙漠西部地下水位和水质变化对植被的影响. 生态学报, 2012, 32(5): 1490-1501.
Zeng X L, Liu T, Zhang W B, Sun Q M, Shen X Y, Si L M. Variations in groundwater levels and quality and their effects on vegetation in the western Grubantonggut Desert. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(5): 1490-1501.

古尔班通古特沙漠西部地下水位和 水质变化对植被的影响

曾晓玲, 刘彤*, 张卫宾, 孙钦明, 沈雪莹, 司朗明

(石河子大学生命科学学院, 石河子 832000)

摘要: 通过对比分析古尔班通古特沙漠西部 3a 地下水位和水质的变化特点, 研究了地下水位和水质变化对地表土壤理化性质、植物多样性、及建群种梭梭种群生长与更新的影响。发现地下水位和土壤理化性质空间变异较大, 最浅地下水位为 3.3 m, 最深可达 24.2 m, 主要集中在 6—8 m; 土壤电导率、pH 值、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 均在表层 0—40 cm 含量较高, 变异系数随土层深度的增加而减小。在时间上地下水位受准噶尔盆地上游农田用水的影响, 水位呈季节性波动。一年中最高水位出现在 4 月, 最低水位在 7 月。玛纳斯河向下游输水对提高盆地地下水位具有明显作用, 地下水位平均可升高 4.3 cm, 地下水矿化度平均增幅 1 g/L。地下水位对退化区物种多样性影响不大, 但对梭梭生长产生显著影响。梭梭生长的适宜地下水位为 5—8 m, 且地下水矿化度小于 4 g/L。地下水位大于 8 m 导致梭梭种群衰退, 而地下水位小于 4 m 时, 地下水矿化度影响土壤表层积盐, 进而显著地降低物种多样性, 阻碍梭梭幼苗更新, 导致梭梭种群衰败。总结认为准噶尔盆地上游的玛纳斯河断流和农业灌溉对古尔班通古特沙漠西部平原地区的地下水位和水质产生显著影响, 梭梭退化与地下水位变化显著相关, 必须引起高度重视。

关键词: 古尔班通古特沙漠; 玛纳斯河; 地下水; 土壤积盐; 植被退化

Variations in groundwater levels and quality and their effects on vegetation in the western Grubantonggut Desert

ZENG Xiaoling, LIU Tong*, ZHANG Weibin, SUN Qinming, SHEN Xueying, SI Langming

College of Life Science, Shihezi University, Shihezi 832000, China

Abstract: Groundwater is a key component of the water cycle in arid ecosystems due to low precipitation, high surface runoff and high evaporative demand. It has a direct influence on the growth and development of natural vegetation, species diversity, and ecosystem metabolism. This study reports on the variation in groundwater levels and quality in the western region of the Grubantonggut Desert over three consecutive years. We investigated how groundwater level and quality affect physical and chemical properties of soil, species diversity, and the growth and regeneration of *Haloxylon ammodendron*. We established 20 inspection wells for measuring groundwater level over a period of three consecutive years. These inspection wells were set up at intervals of 7 km to 10 km from west to east in longitude and north to south in latitude, which according to the situation of the degenerate and distribution of *Haloxylon ammodendron* population in the study area. The study area contain habitat which is plain and small and big sand-dunes. The results show that groundwater levels varies widely in this area, ranging from 3.3 m to 24.2 m, averaging 6 m to 8 m. The soil physical-chemical factors also vary greatly across this area. Soil EC, pH, Cl^- and SO_4^{2-} have higher values at depths of 0 cm to 40 cm; their coefficients of variation decrease at greater depths. The groundwater level exhibits seasonal variation, influenced by upstream irrigation. The highest and lowest

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划重点项目(2007BAC17B03)

收稿日期: 2011-01-25; 修订日期: 2011-08-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liutong1968@yahoo.com.cn

groundwater levels appear in April and July, respectively. The Manas River plays an important role in recharging groundwater in the study area, which of course varies between years. Approximately 75% of the groundwater level found in the inspection wells rises in 2010 compared with last year, which rises seasonally by 4.3 cm on average, while the mineralization increases to 1 g/L on average. The groundwater level has a weak effect on species diversity in the degraded area, while it has a significant impact on the growth of *Haloxylon ammodendron*. We find that the suitable groundwater level for growing *Haloxylon ammodendron* is 5 m to 8 m and the optimal mineralization level is less than 4 g/L. *Haloxylon ammodendron* populations decline when groundwater level is more than 8 m. When the groundwater level is less than 4 m, groundwater mineralization causes salt deposition on the soil surface. This reduces the level of species diversity significantly and blocks the regeneration of *Haloxylon ammodendron*. This in turn leads to declines in the *Haloxylon ammodendron* population. In summary, the depletion of the Manas River related to agricultural irrigation influences the groundwater levels and the quality of the ecosystem in the western Grubantonggut Desert. The decline in the *Haloxylon ammodendron* population is significantly correlated with groundwater levels. This should be considered in future natural resource conservation planning for this area.

Key Words: Grubantonggut Desert; Manasi River; groundwater; soil salinity; vegetation degeneration

当前,自然和人为因素导致地球物理、生物环境改变的全球变化正深刻影响人类的生存环境,其中陆地水资源变化和人文循环改变对干旱区自然植被的影响尤为明显^[1-5]。地下水是水资源的重要组成部分和表现形式,从时间和空间上直接或间接作用于地表生态环境,地下水变化直接影响天然植被生长发育,对于干旱区生物多样性保育,维持生态系统稳定具有不可替代的作用^[6-10]。

西北干旱区的水资源严重稀缺,天然降水无法满足植物正常的生长需求^[11-12],地下水补给成为植物用水的关键部分^[13-15],而对于此地区存在的山地-平原-盆地等特殊地貌,地表水和地下水主要来自山区降水,二者同出一源,下游以及盆地地下水变化与上游水资源利用状况存在着必然联系^[16-18]。

准噶尔盆地是中国第二大盆地,位于新疆维吾尔自治区北部,天山山脉、塔尔巴哈台山脉、阿尔泰山脉等之间,盆地中央有我国第二大沙漠——古尔班通古特沙漠。发源于山地的河流由冰川和融雪水补给,流经冲积平原,最终注入盆地。20世纪70年代以来,人类活动明显改变了准噶尔盆地天然水循环格局,玛纳斯河断流,绿洲区地下水位下降,盆地中央的玛纳斯湖、艾里克湖、乌伦古湖等面积逐年降低^[19]。近几年我们调查发现准噶尔盆地西部,古尔班通古特沙漠西部平原地区的植被覆盖度下降,群落建群种梭梭(*Haloxylon ammodendron*)发生大面积退化现象,种群更新受阻^[20],靠近克拉玛依的局部地区已经出现严重风蚀。此地区是新疆北部沙尘暴的源区之一^[21],因此研究植被的退化机制,提出科学合理的植被恢复措施极有必要。

以前对于玛纳斯河断流和玛纳斯湖干涸产生的生态效应方面的研究,学者认为对沼生植物影响较大,对植被主体梭梭影响较小,种群仍能维持正常更新^[19,22]。然而近年发现梭梭退化就发生在玛纳斯湖附近的平原地区,因此玛纳斯河流域50 a的绿洲扩张对地表径流和地下水的直接和间接影响是否恶化了盆地植被的生长环境,进而导致植被退化等问题极有必要深入研究。目前,通过对塔里木河^[23-25]、石羊河^[26]、黑河流域^[27]研究发现,天然植被的生长状况与地下水位变化密不可分,而对准噶尔盆地的相关研究非常少。另外,地下水变化与植被演变之间有着复杂的关系,涉及地下水、土壤、植被等相互之间的动态平衡^[28],水质也是影响植被生长的重要因素^[29-33],但对于地下水水质对植被的影响研究较少^[24,34-36]。

2009年12月至2010年3月,准噶尔盆地周缘绿洲区发生了50 a不遇的强降水,比历年同期增多1.5倍。2010年夏季玛纳斯河流域遭受大范围的洪水灾害^[37],断流的玛纳斯河向下游泄洪量超过历年,这种特殊事件对准噶尔盆地地下水位产生什么影响?上游农业用水与盆地地下水之间存在什么样关系?地下水位和水质变化是否与植被退化相关联等问题极有必要深入探讨。为此在2008—2010年对准噶尔盆地西部腹地地下水调查的基础上,结合玛纳斯河上游输水变化,分析上游地表水变化与盆地地下水位、水质关系,地下水

位变化对物种多样性的影响,探讨植被退化原因,为本地植被的生态恢复提供依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区自然概况

研究区位于准噶尔盆地腹地西部平原地带,古尔班通古特沙漠西部,老玛纳斯湖的湖盆地带^[38],新玛纳斯湖南部。地理位置为 45°16′—45°29′N,85°12′—86°38′E,地势平坦,伴有 2—3 m 左右的矮沙丘,海拔高度在 250—350 m。7 月份平均气温大于 27 °C,绝对最高气温超过 44 °C,而 1 月份平均气温低于 -19 °C,绝对最低气温在 -43 °C 以下,年降水量约在 80 mm 以下,年蒸发量 3600 mm 以上,属典型的温带荒漠干旱气候^[39]。近 10a 来本地区降水稀少,与沙漠周缘的莫索湾地区、克拉玛依地区和和布克赛尔地区等年降水量增加的趋势明显不同。

研究区内多为地表径流的洼地以及古湖(河)相地带,积水洼地较多。由于积水蒸发,土壤表层形成一层物理结皮,表层聚盐现象十分严重,形成一层坚硬的盐结壳,盐渍化程度较高^[20]。土壤主要为龟裂性盐化粘土,部分为沙壤土。植物多样性较低,调查样地中共发现物种 26 种,多旱生具耐盐特性,短命植物极少。以梭梭(*Haloxylon ammodendron*)为优势物种、伴有少量无叶假木贼(*Anabasis aphylla*)、淡枝沙拐枣(*Calligonum leucocladum*)、褐翅猪毛菜(*Salsola korshinaki*)。草本植物主要有尖叶盐爪爪(*Kalidium cuspidatum*)、尖翅地肤(*Kochia odontoptera*)、犁苞滨藜(*Atriplex dimorphostegia*)、驼蹄瓣(*Zygophyllum fabago*)等。

1.2 玛纳斯河流域绿洲区农业灌溉情况

玛纳斯河流域各团场、乡镇的农业主要以棉花种植为主,占农业总播种面积的 68%—72%^[40-41],2009 年和 2010 年种植结构发生部分调整,增加了小麦面积,但仅占 11.9%。从玛纳斯河流域的金沟河上游引水量看,一年最大灌溉量出现在 7 月,6—8 月为用水高峰(图 1),10 月底至 11 月为冬小麦灌溉时间,又出现了第二个用水小高峰。2010 年 7—8 月玛纳斯河沿岸遭遇了 10a 不遇的洪灾,形成了大面积水域,农作物受灾面积 1874.4 hm²。

1.3 研究方法

1.3.1 地下水位的观测

在古尔班通古特沙漠西部,根据梭梭种群退化和分布情况,沿东西经向和南北纬向每隔 7—10 km,围绕梭梭种群退化的不同程度设置地下水位观测井 20 眼(P1—P20),跨越生境包括平原、小沙丘和高大沙丘,东西方向跨度近 120 km,南北方向跨度近 80 km,经过玛纳斯河古河道和沙漠积水湖(当地人称“无名湖”),距离玛纳斯湖最近距离 24 km,距离克拉玛依地区 32 km。自 2008 年 1 月至 2010 年 12 月采用测钟法每月观测地下水位。

1.3.2 植被调查

2008 年 6 月—2010 年 7 月,在观测井附近设置 50 m×50 m 的样方,每个样方划分为 25 个 10 m×10 m 的小样方进行植被调查。调查内容包括(1)样方内物种种类和数量;(2)建群种梭梭活株和死株数量以及植株冠幅;(3)梭梭幼苗更新数量和幼苗存活数量。植被分析指标包括 Gleason 丰富度指数和梭梭的盖度、衰退率(枯枝占 50% 以上的植株与总株数的比值)以及幼苗死亡率。

1.3.3 土壤理化性质和水质分析

在每个植被调查样地内挖取 120 cm 深的土壤剖面,分别采集 0—40 cm、40—80 cm、80—120 cm 土层土壤,共计 228 份。土壤样品自然风干后过 2mm 孔径的筛子,制备 5:1 的土壤浸提液,测定的要素主要有 SO₄²⁻、Cl⁻、Ca²⁺、Mg²⁺、pH 值和电导率,具体测定方法:SO₄²⁻ 采用 EDTA 间接络合滴定法,Cl⁻ 采用硝酸银滴定法,Ca²⁺

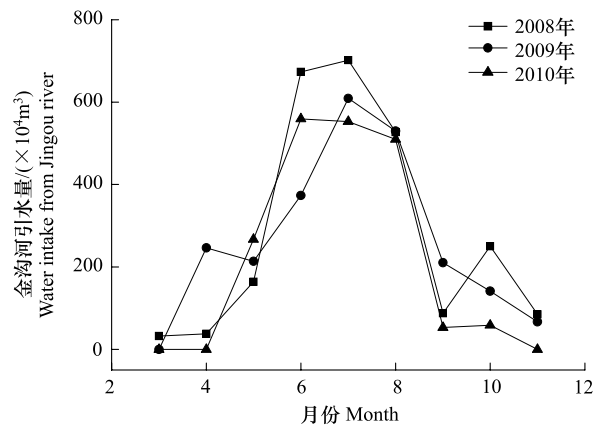


图 1 金沟河各月引水量变化

Fig. 1 Changes of water intake from Jingou river in each month

和 Mg^{2+} 采用 EDTA 滴定法, pH 采用 EC307 型 pH 酸度计测定; 水溶性盐总量采用电导法, 电导率用 DDSJ-308A 型电导率仪测定。水样于每年 7 月采集, 采用相同的方法测定水样中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 含量, 矿化度采用称重法测量。

1.3.4 数据处理

地下水最低水位出现在每年 7 月, 因此以每年 7 月的水位数据进行年际间水位变化对比。年际间的水位变化小于 11 cm, 以 2010 年的地下平均水位和土壤 0—40 cm 电导率分别与样地物种丰富度、梭梭盖度和幼苗死亡率等进行回归分析, 探讨地下水位和土壤理化性质对植被的影响。应用 Canoco (Version 4.5) 分析软件进行 RDA 分析, 探究地下水与土壤表层理化特征对植被的综合影响, 以及地下水水质对地表土壤理化性质的影响。并用 CanoDraw (Version 4.0) 作图的软件来完成绘图。由于生长于高大沙丘的白梭梭 (*Haloxylon persicum*) 种群与平原区的梭梭 (*Haloxylon ammodendron*) 用水方式明显不同, 位于研究区东侧 15 号观测井地下水水位达 24.2 m 时仍能正常生长, 所以本文进行水位回归分析时将该井水位列为奇异点, 未进行计算。

2 结果与分析

2.1 研究区地下水位年际和空间变化特征

由图 2 可以发现, 研究区地下水位在不同样地间变化较大, 最浅的仅有 3.3 m, 深的可达到 24.2 m, 大多数观测井水位集中分布在 6—8 m。一年中每个样地地下水位呈多次波动, 80% 观测井最大埋深水位出现在 7 月, 20% 出现在 8—11 月, 而最小埋深出现在 4 月, 地下水位的波动随样点不同而变化不一, 变幅在 0—40 cm 之间, 其中靠近玛纳斯河道和无名湖的 3 眼观测井水位波动最大, 可达 40 cm。

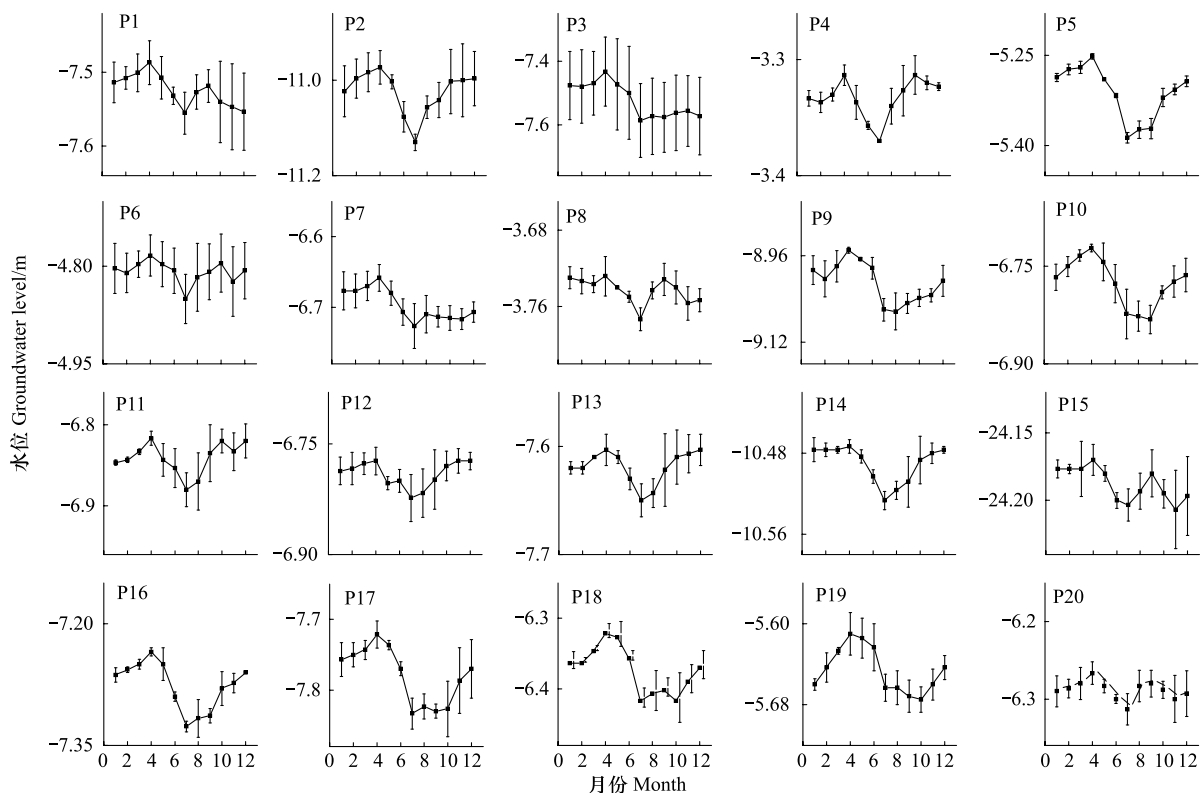


图 2 地下水位的月变化 (平均值±标准误)

Fig. 2 Temporal changes of groundwater level in 20 groundwater monitoring wells (Mean±SE)

P1—P20 代表 20 眼井

地下水位在年际间变化明显, 研究区 75% 的观测井水位 2010 年较前一年有所上升, 增幅为 1—11 cm; 矿化度从 2008 年至 2010 年呈现逐渐升高的趋势 (图 3)。靠近玛纳斯河无名湖附近的两眼观测井矿化度极高, 可达 20 g/L, 较其他观测井其矿化度增幅明显。

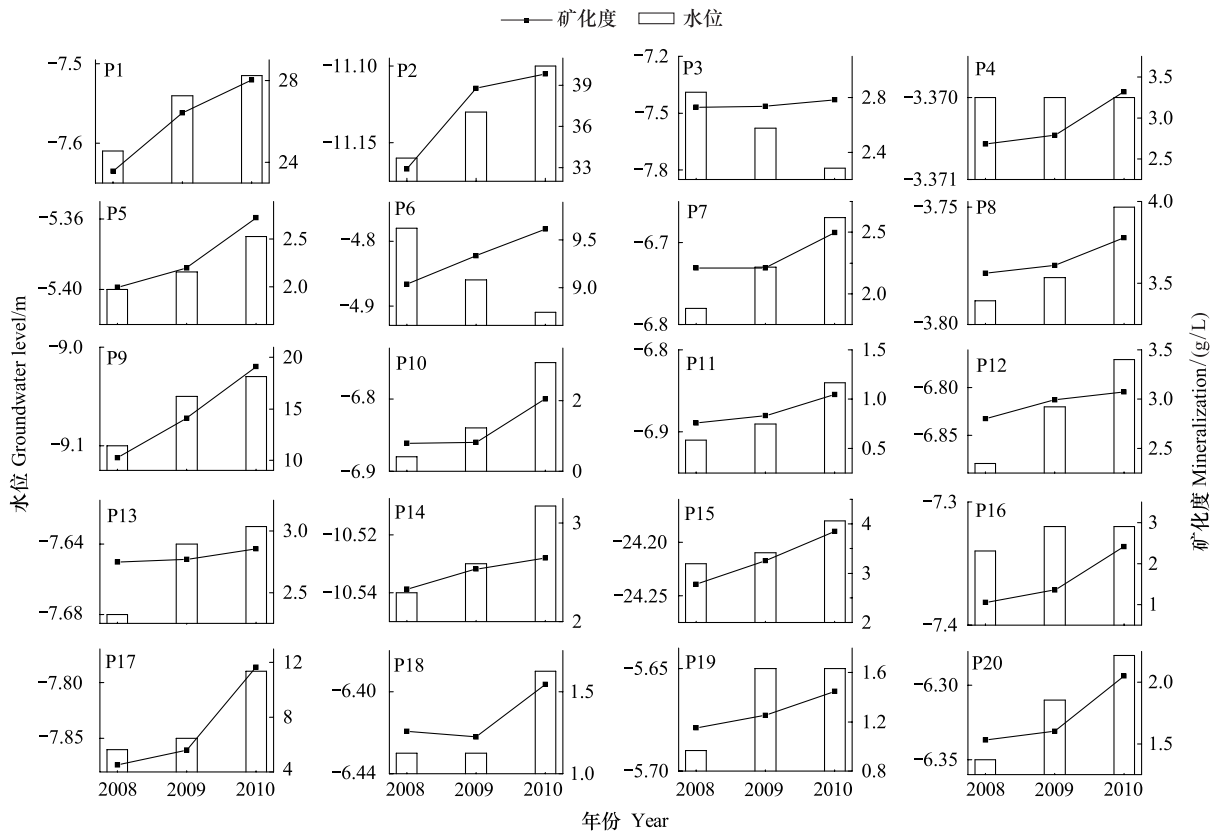


图3 地下水水位和水质在空间和时间尺度上的变化

Fig. 3 Spatial and temporal variation of groundwater level and mineralization

2.2 研究区土壤的理化特征

从表1可以看出所有土壤指标平均值均在0—40 cm 土层含量较高。在不同样地间同一土层变化较大,除 pH 值的变异系数,其他指标的变异系数都大于 10%,极个别指标变异系数大于 100%。土壤电导率、pH 值、Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 在 0—40 cm 土层的变异系数大于其它土层,说明在垂直方向上,土壤含盐量的变异随土层深度的增加而减小,水平方向上不同样地差异较大,空间变异较高。

表1 样地间不同土层土壤理化因子的变化特征

Table 1 Change characteristic of soil physical-chemical factors in different soil layers among samples

土壤指标 Soil indicators	土层深度/cm Depth	平均值 Mean	标准差 Std. deviation	最大值 Max.	最小值 Min.	变异系数 C. V.
有机质/(g/kg) Organic matter	0—40	3.453	2.025	7.55	1.00	0.586
	40—80	2.013	1.434	5.79	0.78	0.712
	80—120	1.932	0.952	4.09	0.92	0.493
电导率/(mS/cm) Soil conductivity	0—40	2.206	1.344	5.65	0.48	0.553
	40—80	1.814	0.684	3.2	0.47	0.377
	80—120	1.617	0.655	3.08	0.37	0.405
pH	0—40	9.003	0.625	10.12	8.04	0.069
	40—80	8.904	0.538	10.4	8.25	0.060
	80—120	8.959	0.484	9.7	8.00	0.054
Cl ⁻ /(g/kg)	0—40	0.142	0.225	0.930	0.01	1.584
	40—80	0.125	0.089	0.370	0.01	0.712
	80—120	0.116	0.055	0.220	0.03	0.474

续表

土壤指标 Soil indicators	土层深度/cm Depth	平均值 Mean	标准差 Std. deviation	最大值 Max.	最小值 Min.	变异系数 C. V.
SO ₄ ²⁻ /(g/kg)	0—40	1.341	0.135	1.55	1.06	0.101
	40—80	1.305	0.127	1.48	0.94	0.097
	80—120	1.330	0.120	1.60	0.84	0.090
Ca ²⁺ /(g/kg)	0—40	0.357	0.282	0.95	0.06	0.790
	40—80	0.309	0.310	1.44	0.02	1.003
	80—120	0.265	0.258	0.85	0.04	0.974
Mg ²⁺ /(g/kg)	0—40	0.094	0.135	0.53	0.02	1.436
	40—80	0.061	0.045	0.21	0.02	0.737
	80—120	0.046	0.058	0.28	0.01	1.261

2.3 研究区水盐变化对天然植被的影响

2.3.1 水盐变化对植物物种丰富度的影响

研究发现退化区植被构成极其单一, 植被以梭梭和猪毛菜为主, 部分样地伴有怪柳和沙拐枣, 各年的物种丰富度指数与地下水位均不存在线性关系(图4)。物种丰富度与土壤电导率呈极显著负相关, 随土壤表层电导增加而减小, 说明土壤积盐是制约退化区物种丰富度的重要原因。

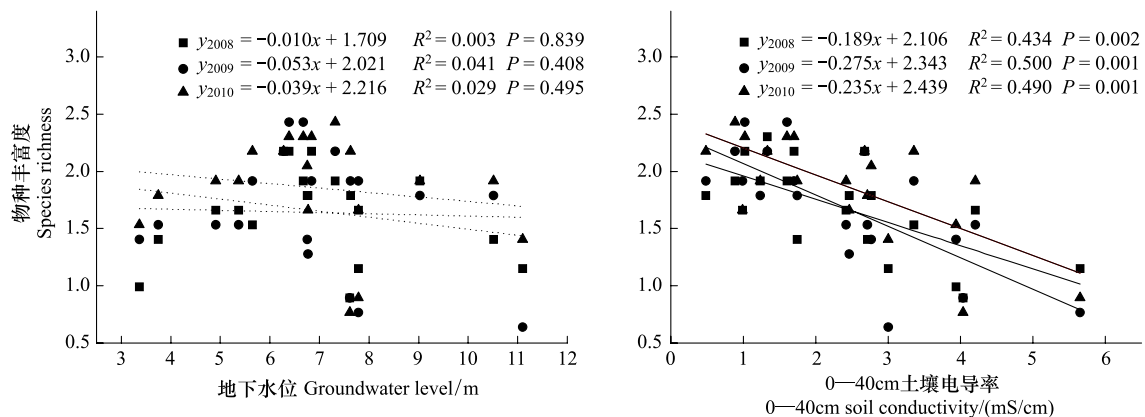


图4 水盐变化与物种丰富度的关系

Fig. 4 Relationship between groundwater level, soil salinity and species richness

2.3.2 水盐变化对梭梭生长的影响

梭梭生长受地下水位和土壤电导率的共同影响, 其盖度和衰退率与地下水位呈二次线性相关关系(图5)。地下水位为5—8 m时, 梭梭种群普遍盖度较高, 衰退率低, 地下水位为3—5 m和8—11 m均不利于梭梭生长。梭梭盖度与0—40 cm土壤电导率存在显著负相关($P=0.002$), 而衰退率与土壤电导率存在极显著正相关($P=0.000$), 表明土壤表层电导率增大对梭梭生长产生不利影响, 将导致种群盖度降低、衰退率增大。

2.3.3 水盐变化对梭梭种群幼苗更新的影响

由图6可知, 梭梭幼苗死亡率与地下水位不存在线性相关, 但与土壤电导率呈极显著正相关, 即土壤0—40 cm土层电导率越大对梭梭幼苗存活越不利。富集在土壤表层的盐是梭梭幼苗存活的限制因素, 制约了梭梭种群的更新。

2.4 地下水与土壤表层理化特征对植被的综合影响

RDA 排序的第一、第二轴的特征值分别为 0.799 和 0.047(表2), 特征值之和占所有排序轴总特征值之和的 84.5%, 可以解释植被信息的 99.8%。由植被—环境累计解释量可知, 第一和第二轴可累计解释植被—环境关系 99.8% 的信息。第一轴是土壤电导率的变化轴(表3), 沿第一轴方向, 随着土壤电导率的增大, 梭梭

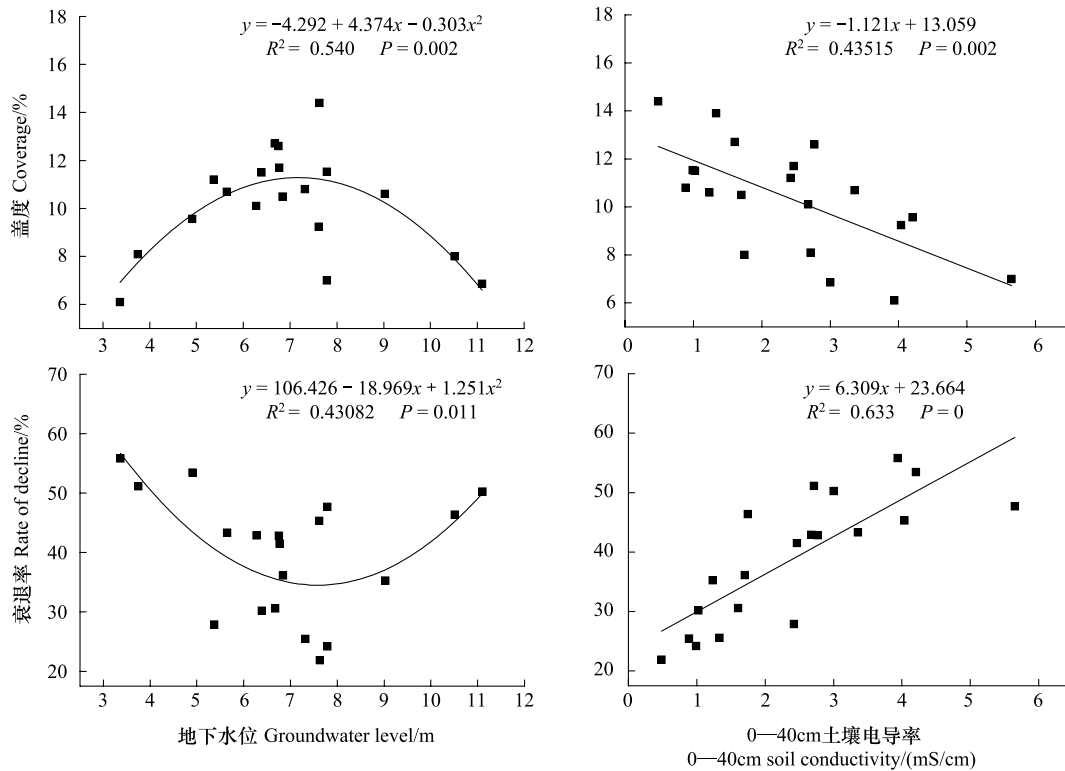


图5 水盐变化与梭梭生长现状的关系

Fig. 5 Relationship between groundwater level, soil salinity and growth of *Haloxylon ammodendron*

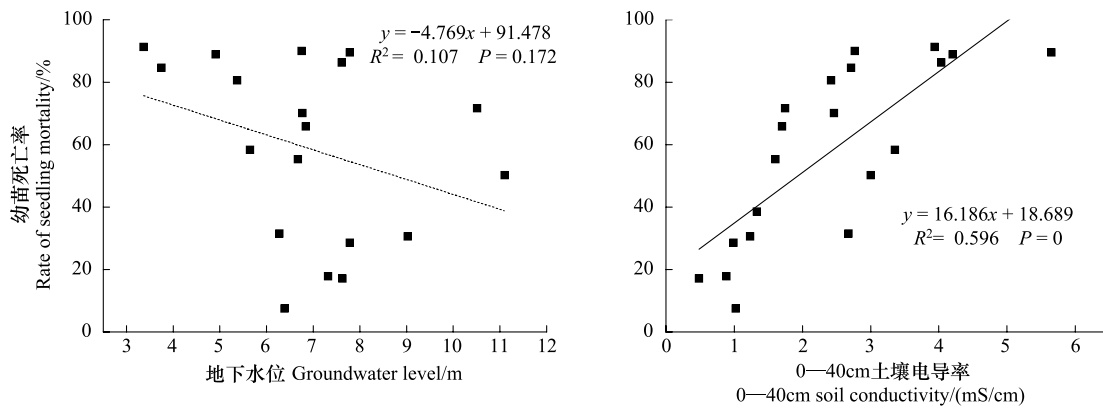


图6 水盐变化与幼苗死亡率的关系

Fig. 6 Relationship between groundwater level, soil salinity and mortality rate of seedling

衰退率、幼苗死亡率也随之增大,而梭梭盖度、物种丰富度与土壤表层电导率箭头方向相反,表明土壤电导率是制约研究区物种丰富度、梭梭生长与更新的重要因素之一。地下水矿化度和土壤电导率与梭梭盖度箭头方向相反(图7),以土壤中的 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和地下水中的 Cl^- 起主导抑制作用,而土壤有机质和 SO_4^{2-} 对物种多样性有一定促进作用。其中土壤电导率和地下水矿化度与土壤表层 Cl^- 呈显著正相关($P < 0.05$),表明氯化盐是土壤和地下水中盐分的主要表现形式。地下水位与梭梭幼苗死亡率夹角较大,方向相反,但影响较弱。由于地下水位对梭梭生长的影响不是线性关系(图5),如RDA分析地下水位与梭梭衰退率、盖度之间呈 90° 左右夹角。

RDA分析还可以发现地下水中的矿化度对土壤表层的电导率影响较大,二者夹角较小,连线较长(图

7)。选取矿化度小于 4 g/L 的 15 眼井, 进行不同地下水位对 0—40 cm 表层土壤电导率的相关分析, 发现地下水位埋深对土壤表层盐分积累有显著作用 ($R^2 = 0.427, P = 0.008$), 随着水位的加深富集在表层的盐分减少。

表 2 RDA 排序的特征值及累积解释量

Table 2 Eigenvalues, cumulative variances of vegetation data and vegetation-environment relationship of RDA ordination

排序轴 Axis	特征值 Eigenvalues	植被累积解释量/% Cumulative percentage variance of vegetation	植被-环境关系累积解释量/% Cumulative percentage variance of vegetation-environment relation
第 1 轴 Axis1	0.799	79.9	94.3
第 2 轴 Axis2	0.047	84.5	99.8
第 3 轴 Axis3	0.001	84.7	100.0
第 4 轴 Axis4	0.000	84.7	100.0

表 3 环境因子与排序轴的相关性分析

Table 3 Correlation coefficient between environmental factors and the first 2 axes of RDA ordination

	水位 Level	矿化度 min_w	pH_w	$\text{SO}_4^{2-}_w$	Ca^{2+}_w	Mg^{2+}_w	Cl^-_w
第 1 轴 Axis1	0.3195	-0.111	-0.0558	0.1177	-0.045	-0.0499	-0.0983
第 2 轴 Axis2	-0.1328	-0.3841	0.2935	0.2784	-0.292	-0.3557	-0.3523
	电导率 EC_s	pH_s	有机质 OM_s	$\text{SO}_4^{2-}_s$	Cl^-_s	Ca^{2+}_s	Mg^{2+}_s
第 1 轴 Axis1	-0.7894	0.2061	0.2167	0.4806	-0.4657	-0.1243	0.011
第 2 轴 Axis2	-0.2343	0.2986	0.1611	0.3849	-0.1948	-0.5781	-0.025

表中标记带有 s 和 w 分别代表土壤和地下水中相应的指标

3 结论与讨论

准噶尔盆地具有西北干旱区典型的山地、绿洲、盆地地貌特征, 98% 的水资源形成于山区降水, 平原区降水量少, 基本上不产生地表径流, 地下水主要由地表水转换形成。其中地下水天然补给量(降水入渗和山前侧向补给)占地下水补给量的 14%, 而河道渗漏、渠系渗漏、田间入渗等转换补给量占地下水补给量的 86% [42]。但是 2002 年以来玛纳斯河流域大面积推广节水滴灌技术, 较大田漫灌亩节水 50%—60% 以上。目前玛纳斯河沿岸的农八师 76%—88% 棉田采用了膜下滴灌技术, 再加上农田防渗渠道的修建, 极大地降低了绿洲农田区水分转化地下水的数量。同时, 节水滴灌技术助长了大面积垦荒, 由于这些垦荒农田渠系不配套, 均以抽取地下水为主, 有可能导致地下水位下降。本研究发现准噶尔盆地地下水位与上游农田灌溉用水存在此消彼长的关系, 地下水位最高出现在来年的 3 月至 4 月农闲时期, 并且随着 5 月以后农业用水的增加, 大多数井的水位从 5 月出现下降, 6 月至 8 月是上游农作物用水的高峰期, 也是天然植被的生长季, 上游地区大量开采地下水, 导致地下水位持续下降, 在 7 月出现最低水位。所以准噶尔盆地上游农业灌溉方式变化, 改变了地下水的补给数量, 上游用水高峰与盆地地下水位下降之间的时差很短, 表明盆地上游对地下水的过渡利用对盆地地下水位下降产生直接影响。

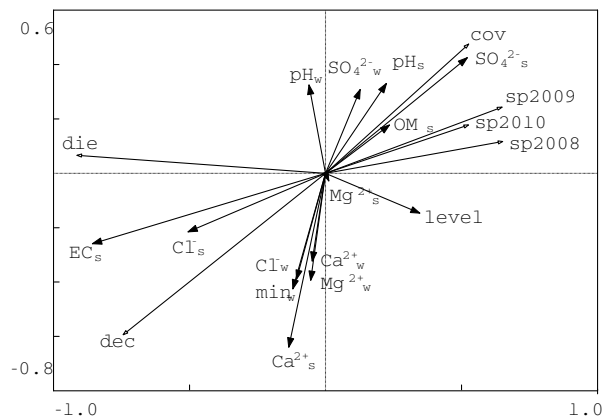


图 7 地下水与土壤表层理化特征对植被影响的冗余分析

Fig. 7 Redundancy analysis of groundwater and soil physical-chemical factors impact on vegetation

图中标记带有 s 和 w 分别代表土壤和地下水中相应的指标, level: 水位, OM: 有机质, min: 矿化度, die: 梭梭幼苗死亡率, dec: 梭梭衰退率, cov: 梭梭盖度, sp2008, sp2009, sp2010 分别表示 2008 年, 2009 年和 2010 年的物种丰富度

2010年玛纳斯河弃水量增加对盆地地下水位上升产生一定作用,但上升幅度比较有限,平均增幅为4.3 cm。从地下水矿化度的年际变化可以发现,2010年上游地表水大量入渗可淋洗土壤盐分,地下水矿化度增加非常明显,所以盆地中心玛纳斯湖的盐湖形成是山地-绿洲-盆地生态系统中以水为动力长期作用的结果。然而目前这种节水滴灌技术极有可能导致土壤盐分在绿洲农田中积累,如果长期如此是否会导致农田盐渍化等问题需要深入研究。

研究发现物种丰富度与地下水位没有直接关系,与土壤电导率呈负相关,主要是因为研究区以草本植物种类居多,1年生草本占总物种数70%以上,其根系浅,生长过程中无法利用地下水。研究区55%的调查样地的土壤电导率在2—6mS/cm之间,平均电导率2.206mS/cm,pH值9以上,属于盐渍化土壤。地下水位小于5 m时,土壤容易发生积盐,一旦矿质元素在表层积聚,水分垂向入渗困难,造成土壤表层聚盐严重,积水在洼地蒸发后形成物理结皮,不仅对植物产生盐害,而且使地表难以截留种子,从而形成不了持久种子库,对种子定居、萌发和成苗均产生不利影响。样地除生长梭梭、无叶假木贼等灌木以外,多生长尖叶盐爪爪、尖翅地肤、犁苞滨藜、驼蹄瓣等耐盐植物,物种多样性水平较低。

高的土壤含盐量不仅影响1年生植物的分布,也影响了建群种梭梭种群的更新。分析发现地下水位对梭梭幼苗存活没有明显影响,但梭梭幼苗死亡率与土壤电导率存在极显著正相关。梭梭幼苗根系86%分布在0—60 cm土层^[43],而本研究地下水位在3 m以下,所以梭梭幼苗生长无法利用地下水,再加上土壤中高的含盐量,导致梭梭幼苗生理缺水。植物产生种子的能力以及种子萌发的能力、萌发后幼苗的生长和成活能力共同决定种群的更新能力,其中任何一个阶段受到限制都可能导致种群更新受阻^[44-46]。调查发现退化区梭梭植株虽然能产生大量种子,并且在开春后有降水条件下萌发,但萌发后幼苗死亡率高,死亡率高达90%以上,从而导致梭梭种群更新受阻,形成了退化区幼树缺乏,种群年龄结构老龄化而呈衰退状况^[20]。

本研究发现平原区退化的梭梭生长受地下水位和水质的双重影响,其盖度和衰退率均与地下水位呈二次函数关系,与土壤表层电导率呈直线相关。地下水位在3—4 m时,土壤表层平均电导率为3.43mS/cm,梭梭生长不良甚至死亡;而地下水位大于8 m时,即使土壤电导率仅为1.24mS/cm,梭梭仍然衰退。当矿化度为小于4 g/L且水位为6—8 m时,此时梭梭生长良好。由于本研究根据梭梭种群退化情况取样,代表了其衰退的各阶段,所以推断本地梭梭退化主要是由于地下水位逐渐下降和土壤表层盐渍化双重作用的结果,由于地下水位和矿化度决定了土壤表层电导率,所以地下水位变化是本地区植被退化的主导因素。

10世纪70年代,玛纳斯河断流是新疆北部玛纳斯河流域重要的历史事件,当时产生的生态效应只是局部的,对湿生植物影响最严重,而对河道较远的梭梭影响不大^[22],80年代初研究区梭梭的平均盖度可以达到25%,局部地方的盖度可以达到50%^[22,47-48],但是到2008年以后,梭梭的盖度仅为10.41%,衰退率达40%,30a梭梭盖度的变化触目惊心。由此可见玛纳斯河断流所引发的植被退化是一个缓慢的过程,对生态环境的影响却是深远的。当前,盆地上游正在推广节水滴灌技术,由此引发大面积无序开荒,对地下水的过量开采^[42],已经明显改变了山地-绿洲-盆地的水文循环模式和水盐平衡模式,土壤盐分在绿洲区滞留而导致盐渍化加剧,盆地地下水位下降而导致植被退化。由于该变化涉及盆地、绿洲、山地整个山盆系统,所以产生的后期连环生态效应可能是区域性的^[49-52],因此对于本地区如何协调经济发展和生态保护的矛盾,促进社会、经济和自然和谐发展是一个不可忽视且急待解决的问题。

致谢:感谢加利福尼亚大学河滨分校李百炼教授对文章写作给予的帮助,感谢美国杜克大学 James F. Reynolds 教授润色英文摘要,感谢石河子大学生命科学学院研究生刘忠权、徐满厚、张荣、董合干对实验过程提供的帮助。

References:

- [1] Newman B D, Wilcox B P, Archer S R, Breshears D D, Dahm C N, Duffy C J, McDowell N G, Phillips F M, Scanlon B R, Vivoni E R. Ecohydrology of water-limited environments: a scientific vision. *Water Resources Research*, 2006, 42: W06302, doi: 10.1029/2005WR004141.
- [2] Breshears D D, Cobb N S, Rich P M, Price K P, Allen C D, Balice R G, Romme W H, Kastens J H, Floyd M L, Belnap J, Anderson J J,

- Myers O B, Meyer C W. Regional vegetation die-off in response to global-change-type drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, 102(42): 15144-15148.
- [3] Oki T, Kanae S. Global hydrological cycles and world water resources. *Science*, 2006, 313(5790): 1068-1072.
- [4] Koepke D F, Kole T E, Adams H D. Variation in woody plant mortality and dieback from severe drought among soils, plant groups, and species within a northern Arizona ecotone. *Oecologia*, 2010, 163(4): 1079-1090.
- [5] Shen Y J, Chen Y N. Global perspective on hydrology, water balance, and water resources management in arid basins. *Hydrological Processes*, 2010, 24(2): 129-135.
- [6] Lammerts E J, Maas C, Grootjans A P. Groundwater variables and vegetation in dune slacks. *Ecological Engineering*, 2001, 17(1): 33-47.
- [7] Hayashi M, Rosenberry D O. Effects of ground water exchange on the hydrology and ecology of surface water. *Ground Water*, 2002, 40(3): 309-316.
- [8] Elmore A J, Manning S J, Mustard J F, Craine J M. Decline in alkali meadow vegetation cover in California: the effects of groundwater extraction and drought. *Journal of Applied Ecology*, 2006, 43(4): 770-779.
- [9] McLendon T, Hubbard P J, Martin D W. Partitioning the use of precipitation- and groundwater-derived moisture by vegetation in an arid ecosystem in California. *Journal of Arid Environments*, 2008, 72(6): 986-1001.
- [10] Hao X M, Chen Y N, Li W H. Indicating appropriate groundwater tables for desert river-bank forest at the Tarim River, Xinjiang, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 152(1/4): 167-177.
- [11] Li X Y, Zhang X M, Zeng F J. Water relations on alhagi sparsifolia in the southern fringe of Taklamakan Desert. *Acta Botanica Sinica*, 2002, 44(10): 1219-1224.
- [12] Zhao W Z, Liu H. Recent advances in desert vegetation response to groundwater table changes. *Acta Ecologica sinica*, 2006, 26(8): 2702-2708.
- [13] Rodriguez-Iturbe I. Ecohydrology: a hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics. *Water Resources Research*, 2000, 36(1): 3-10.
- [14] Guo Z R, Liu H T. Eco-depth of groundwater table for natural vegetation in inland basin, northwestern China. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2005, 19(3): 157-161.
- [15] Fan Z L, Chen Y N, Li H P, Ma Y J, Kurban A, Abdimijit. Determination of suitable ecological groundwater depth in arid areas in northwest part of China. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, 22(2): 1-5.
- [16] Xia J, Sun X T, Tan G. The progress and prospect of water cycle study in western China. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18(1): 58-67.
- [17] Elmore A J, Mustard J F, Manning S J. Regional patterns of plant community response to changes in water: Owens valley, California. *Ecological Applications*, 2003, 13(2): 443-460.
- [18] Liu C M, Chen Y N, Xu Z X. Eco-hydrology and sustainable development in the arid regions of China. *Hydrological Processes*, 2010, 24(2): 127-128.
- [19] Cheng W M, Zhou C H, Liu H J, Zhang Y, Jiang Y, Zhang Y C, Yao Y H. The oasis expansion and eco-environment change over the last 50 years in Manas River Valley, Xinjiang. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, 35(11): 1074-1086.
- [20] Liu B, Liu T, Li L, Zhao X J, Han Z Q, Ma D W. Cause of large-scale *Haloxylon ammodendron* degeneration in west Gurbantonggut Desert. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(4): 637-642.
- [21] Qian Y B, Wu Z N, Chen D M, Zhang L Y, Wang X Y, Li D M. Characteristics of grain sizes for surface sediments on source regions of sand-dust storms in mid-south Junggar Basin. *Journal of Desert Research*, 2005, 25(6): 831-837.
- [22] Huang P Y, Huang P Z, Gu C G. Preliminary study about the impact of dry up of Manasi lake on vegetation. *Arid Land Geography*, 1987, 10(4): 30-36.
- [23] Ye Z X, Chen Y N, Li W H. Ecological water demand of natural vegetation in the lower Tarim River. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(2): 261-272.
- [24] Chen Y N, Li W H, Xu H L, Liu J Z, Zhang H F, Chen Y P. The influence of groundwater on vegetation in the lower reaches of Tarim River, China. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(4): 542-549.
- [25] Xu H L, Chen Y N, Yang G. Effect of translating water on vegetation at the lower reaches of Tarim River. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2003, 24(4): 18-22.
- [26] Guo C L, Li F M. Ecological problem and its rehabilitation countermeasures in Shiyang River Basin. *Journal of Desert Research*, 2010, 30(3): 608-613.
- [27] Zhao C Y, Li S B, Jia Y H, Jiang Y C. Dynamic changes of groundwater level and vegetation in water table fluctuant belt in lower reaches of Heihe River: coupling simulation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(12): 2687-2692.
- [28] Chen Y J, Chen Y N, Li W H, Liu J Z. Three stages of the groundwater chemical properties reacting on the intermittent water deliveries in lower Tarim River, China. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2006, 27(7): 1299-1304.

- [29] Paranychianakis N V, Chartzoulakis K S. Irrigation of Mediterranean crops with saline water: from physiology to management practices. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 106(2/3): 171-187.
- [30] Li X Y, Song D M, Xiao D N. The variability of groundwater mineralization in Minqin Oasis. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(2): 319-327.
- [31] Goedhart C M, Pataki D E. Ecosystem effects of groundwater depth in Owens Valley, California. *Ecohydrology*, 2010, 4(3): 458-468.
- [32] Li W H, Hao X M, Chen Y J, Zhang L H, Ma X D, Zhou H H. Response of groundwater chemical characteristics to ecological water conveyance in the lower reaches of the Tarim River, Xinjiang, China. *Hydrological Processes*, 2010, 24(2): 187-195.
- [33] Liu W J, Su Y Z, Yang R, Lu X D. Hydrochemical characteristics and spatial-temporal variation of mineralization for the groundwater in Minqin oasis. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2009, 30(10): 2911-2917.
- [34] Horton J L, Kolb T E, Hart S C. Responses of riparian trees to interannual variation in ground water depth in a semi-arid river basin. *Plant, Cell and Environment*, 2001, 24(3): 293-304.
- [35] Gries D, Zeng F, Foetzki A, Arndt S K, Bruelheide H, Thomas F M, Zhang X, Runge M. Growth and water relations of *Tamarix ramosissima* and *Populus euphratica* on Taklamakan desert dunes in relation to depth to a permanent water table. *Plant, Cell and Environment*, 2003, 26(5): 725-736.
- [36] Zhou H H, Chen Y N, Li W H, Chen Y P. Photosynthesis of *Populus euphratica* in relation to groundwater depths and high temperature in arid environment, northwest China. *Photosynthetica*, 2010, 48(2): 257-268.
- [37] Zeng X R. 34.000 mu land of Manas river coast suffers the flood disaster, which was rare in ten years. (2010-08-03) [2010-08-05]. http://www.tianshannet.com.cn/news/content/2010-08/03/content_5134306_2.htm.
- [38] Chen W M, Zhou C H, Tang Q C, Zhang B P, Yao Y H. Effect of foothill belt on hydro-process of plain area in the northern slope of Tianshan Mountains. *Geographical Research*, 2001, 20(4): 439-445.
- [39] Yin L D. The study of *Haloxylon ammodendron* forest in Haerzhake of Xinjiang. *Journal of Desert Research*, 1993, 13(3): 58-61.
- [40] Statistics Bureau of XPCG and the Survey Office of XPCG of NBS. *Xinjiang Production and Constrection Group Statistical Yearbook-2009*. Beijing: China Statistics Press, 2009: 9-10.
- [41] Statistics Bureau of XPCG and the Survey Office of XPCG of NBS. *Xinjiang Production and Constrection Group Statistical Yearbook-2010*. Beijing: China Statistics Press, 2010: 9-10.
- [42] Deng M J. Studies on water resources strategy in Xinjiang. *China Water Resources*, 2009, (17): 23-27.
- [43] Canadell J, Jackson R B, Ehleringer J B, Mooney H A, Sala O E, Schulze E D. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. *Oecologia*, 1996, 108(4): 83-95.
- [44] Soriano A, Sala O E. Ecological strategies in a Patagonian arid steppe. *Plant Ecology*, 1984, 56(1): 9-15.
- [45] Aguiar M R, Sala O E. Interactions among grasses, shrubs, and herbivores in Patagonian grass-shrub steppes. *Ecologia Austral*, 1998, 8: 201-210.
- [46] Golluscio R A, Sala O E. Plant functional types and ecological strategies in Patagonian forbs. *Journal of Vegetation Science*, 1993, 4(6): 839-846.
- [47] Hu W K. *Haloxylon* Bunge Desert type characteristic and dynamic in southern Zhunger Basin. *Arid Zone Research*, 1984, 1(2): 28-38.
- [48] Zhong H D. The forest type and its characteristics of the *Holoxylon* in Junggar Basin in Xinjiang. *Journal of Desert Research*, 1990, 10(1): 41-49.
- [49] Schwinning S, Sala O E. Hierarchy of responses to resource pulses in arid and semi-arid ecosystems. *Oecologia*, 2004, 141(2): 211-220.
- [50] Le Maitre D C, Milton S J, Jarman C, Colvin C A, Saayman I, Vlok J H J. Linking ecosystem services and water resources: landscape-scale hydrology of the Little Karoo. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007, 5(5): 261-270.
- [51] Wang G X, Yang L Y, Chen L, Kubota J. Impacts of land use changes on groundwater resources in the Heihe River Basin. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(3): 456-466.
- [52] Fu B J, Zhou G Y, Bai Y F, Song C C, Liu J Y, Zhang H Y, Lu Y H, Zheng H, Xie G D. The main terrestrial ecosystem services and ecological security in China. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(6): 571-576.

参考文献:

- [12] 赵文智, 刘鹤. 荒漠区植被对地下水埋深响应研究进展. *生态学报*, 2006, 26(8): 2702-2708.
- [14] 郭占荣, 刘花台. 西北内陆盆地天然植被的地下水生态埋深. *干旱区资源与环境*, 2005, 19(3): 157-161.
- [15] 樊自立, 陈亚宁, 李和平, 马英杰, 艾里西尔·库尔班, 阿布都米吉提. 中国西北干旱区生态地下水埋深适宜深度的确定. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(2): 1-5.
- [16] 夏军, 孙雪涛, 谈戈. 中国西部流域水循环研究进展与展望. *地球科学进展*, 2003, 18(1): 58-67.

- [19] 程维明,周成虎,刘海江,张旻,蒋艳,张一驰,姚永慧. 玛纳斯河流域50年绿洲扩张及生态环境演变研究. 中国科学D辑:地球科学, 2005, 35(11): 1074-1086.
- [20] 刘斌,刘彤,李磊,赵新俊,韩志全,马大伟. 古尔班通古特沙漠西部梭梭大面积退化原因. 生态学杂志, 2010, 29(4): 637-642.
- [21] 钱亦兵,吴兆宁,陈冬梅,张立运,汪溪远,李冬梅. 准噶尔中南部沙尘暴源区地表沉积物粒度特征. 中国沙漠, 2005, 25(6): 831-837.
- [22] 黄培佑,黄丕振,顾春光. 新疆玛纳斯湖的干涸对周围植被影响初探. 干旱区地理, 1987, 10(4): 30-36.
- [24] 陈亚宁,李卫红,徐海量,刘加珍,张宏峰,陈亚鹏. 塔里木河下游地下水位对植被的影响. 地理学报, 2003, 58(4): 542-549.
- [25] 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. 环境科学, 2003, 24(4): 18-22.
- [26] 郭承录,李发明. 石羊河流域生态系统存在的问题及治理对策. 中国沙漠, 2010, 30(3): 608-613.
- [27] 赵传燕,李守波,贾艳红,姜云超. 黑河下游地下水波动带地下水与植被动态耦合模拟. 应用生态学报, 2008, 19(12): 2687-2692.
- [28] 陈永金,陈亚宁,李卫红,刘加珍. 塔里木河下游地下水化学特征对输水响应的阶段性研究. 环境科学, 2006, 27(7): 1299-1304.
- [30] 李小玉,宋冬梅,肖笃宁. 石羊河下游民勤绿洲地下水矿化度的时空变异. 地理学报, 2005, 60(2): 319-327.
- [33] 刘文杰,苏永中,杨荣,吕晓东. 民勤地下水水化学特征和矿化度的时空变化. 环境科学, 2009, 30(10): 2911-2917.
- [37] 曾贤荣. 玛纳斯河沿岸3.4万亩农田遭10年不遇特大洪灾袭击. (2010-08-03) [2010-08-05]. http://www.tianshannet.com.cn/news/content/2010-08/03/content_5134306_2.htm.
- [38] 程维明,周成虎,汤奇成,张百平,姚永慧. 天山北麓前山带对平原区水文过程的影响. 地理研究, 2001, 20(4): 439-445.
- [39] 尹立东. 新疆哈尔扎克梭梭林植被的研究. 中国沙漠, 1993, 13(3): 58-61.
- [40] 新疆生产建设兵团统计局,国家统计局兵团调查队. 新疆生产建设兵团统计年鉴-2009. 北京: 中国统计出版社, 2009: 9-10.
- [41] 新疆生产建设兵团统计局,国家统计局兵团调查队. 新疆生产建设兵团统计年鉴-2010. 北京: 中国统计出版社, 2010: 9-10.
- [42] 邓铭江. 新疆水资源战略问题探析. 中国水利, 2009, (17): 23-27.
- [51] 王根绪,杨玲媛,陈玲,洼田顺平. 黑河流域土地利用变化对地下水资源的影响. 地理学报, 2005, 60(3): 456-466.
- [52] 傅伯杰,周国逸,白永飞,宋长春,刘纪远,张惠远,吕一河,郑华,谢高地. 中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全. 地球科学进展, 2009, 24(6): 571-576.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 5 March, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

- Statistical characteristics of eutrophication process in Dianshan Lake CHENG Xi, LI Xiaoping, CHEN Xiaohua (1355)
- Cadmium assimilation and elimination and biological response in *Pirata subpiraticus* (Araneae: Lycosidae) fed on Cadmium diets
..... ZHANG Zhengtian, ZHANG Guangduo, ZHANG Hucheng, et al (1363)
- Effect of co-cultivation time on camptothecin content in *Camptotheca acuminata* seedlings after inoculation with arbuscular
mycorrhizal fungi YU Yang, YU Tao, WANG Yang, et al (1370)
- Relationship between frequency of sandstorms and air humidity as well as plant phenology: a case study from the Minqin desert
area CHANG Zhaofeng, WANG Yaolin, HAN Fugui, et al (1378)
- Genetic diversity and evolution relationship on mtDNA D-loop in Tibetan yaks
..... ZHANG Chengfu, XU Lijuan, JI Qiumei, et al (1387)
- Geostatistical analysis on spatiotemporal distribution pattern of soil water content of forest gap in *Pinus koraiensis* dominated
broadleaved mixed forest LI Meng, DUAN Wenbiao, CHEN Lixin, et al (1396)
- Soil nitrogen and enzymes involved in nitrogen metabolism under different vegetation in Ziwuling mountain in the Loess Plateau,
China XING Xiaoyi, HUANG Yimei, HUANG Haibo, et al (1403)
- Soil carbon, nitrogen and microbiological characteristics during bamboo high-speed growth
..... WANG Xueqin, ZHANG Qichun, YAO Huaiying (1412)
- Effects of long-term increased soil N on leaf traits of several species in typical Inner Mongolian grassland
..... HUANG Juying, YU Hailong, YUAN Zhiyou, et al (1419)
- Influence of arbuscular mycorrhizal associations on the interspecific competition between mycorrhizal and non-mycorrhizal plants
..... ZHANG Yuting, WANG Wenhua, SHEN Hong, et al (1428)
- Structure and biodiversity of fig wasp community inside syconia of *Ficus virens* Ait. var. *sublanceolata* (Miq.) Corner in Fuzhou ...
..... WU Wenshan, CHEN Youling, CAI Meiman, et al (1436)
- Growth and photosynthetic characteristics of *Epimedium koreanum* Nakai in different habitats
..... ZHANG Yonggang, HAN Mei, HAN Zhongming, et al (1442)
- The critical temperature to Huashan Pine (*Pinus armandi*) radial growth based on the daily mean temperature
..... FENG Xiaohui, CHENG Ruimei, XIAO Wenfa, et al (1450)
- The analysis of grade diversity indices of butterfly community in the Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River
..... MA Qi, LI Aimin, DENG Heli (1458)
- Research on dynamic characteristics of photosynthesis in muskmelon seedling leaves
..... HAN Ruifeng, LI Jianming, HU Xiaohui, et al (1471)
- Effects of different winter covering crops cultivation on methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) emission fluxes from double-
cropping paddy field TANG Haiming, XIAO Xiaoping, SHUAI Xiqiang, et al (1481)
- Variations in groundwater levels and quality and their effects on vegetation in the western Grubantonggut Desert
..... ZENG Xiaoling, LIU Tong, ZHANG Weibin, et al (1490)
- Carbon and nitrogen stable isotope characteristics of particulate organic matter and zooplankton in Liuxihe Reservoir
..... NING Jiajia, LIU Hui, GU Binhe, et al (1502)
- Selection of vegetable seeds native in China instead of the cress seed for evaluating the maturity of biosolids
..... LIU Songsong, XU Tianfen, WU Qitang, et al (1510)
- Effects of anthropogenic nutrient input on organisms from different trophic levels in Hanfeng Lake: evidence from stable carbon
and nitrogen isotope analysis LI Bin, WANG Zhijian, JIN Li, et al (1519)
- Temporal and spatial distribution of phytoplankton in Liusha Bay ZHANG Caixue, CHEN Huiyan, SUN Xingli, et al (1527)
- Study on the supercooling of golden apple snail (*Pomacea canaliculata*)
..... ZHAO Benliang, ZHANG Jia'en, LUO Mingzhu, et al (1538)
- The effects of rice growth stages on the ovarian development and take-off of *Nilaparvata lugens* and *Sogatella furcifera*
..... CHEN Yu, FU Qiang, LAI Fengxiang, et al (1546)
- Cold tolerance of the overwintering egg of *Apolygus lucorum* Meyer-Dür (Hemiptera: Miridae)
..... ZHUO Degan, LI Zhaohui, MEN Xingyuan, et al (1553)
- A suggestion on the estimation method of population sizes of *Niviventer confucianus* in Land-bridge island
..... ZHANG Xu, BAO Yixin, LIU Jun, et al (1562)
- The carbon footprint of food consumption in Beijing WU Yan, WANG Xiaoke, LU Fei (1570)
- Anthropogenic phosphorus flow analysis of Hanshan County in Anhui Province
..... FU Yinyin, YUAN Zengwei, WU Huijun, et al (1578)
- A laboratory study of auctions for water rights transactions in inland river basin: a case study of irrigation areas of Heihe river
basin DENG Xiaohong, XU Zhongmin (1587)
- Review and Monograph**
- A review of the effect of typhoon on forests LIU Bin, PAN Lan, XUE Li (1596)
- Research progress on the effects of ocean acidification on coral reef ecosystems
..... ZHANG Chenglong, HUANG Hui, HUANG Liangmin, et al (1606)
- Interspecific competition among three invasive *Liriomyza* species
..... XIANG Juncheng, LEI Zhongren, WANG Haihong, et al (1616)
- Indicative significance of biogenic elements to eco-environmental changes in waters
..... YU Yu, SONG Jinming, LI Xuegang, et al (1623)
- Recent advances in studies on dissimilatory Fe(III)-reducing microorganisms
..... LI Huijuan, PENG Jingjing (1633)
- Discussion**
- Ecological vulnerability research for Xilingol League, Northern China XU Guangcai, KANG Muye, Marc Metzger, et al (1643)
- Scientific Note**
- Spatial distribution and species composition of zooplanktons in the eastern tropical Pacific Ocean off Costa Rica
..... LIU Bilin, CHEN Xinjun, JIA Tao, et al (1654)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 5 期 (2012 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 5 2012

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@espg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@espg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元