变化环境下塔里木河径流变化及其影响因素分析

王启猛[1,2], 张捷斌[1], 付意成[3]
(1. 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. 中国水科院 水资源研究所, 北京 100044)

摘 要: 通过对塔里木河近 50 a 的年径流资料进行分析, 得到变化环境下流域径流演变趋势, 并从气候变化和人类活动两方面分因子探讨了其对径流变化过程的影响。研究结果表明, 近 50 a 来塔里木河的径流过程发生了显著变化。源流出山口年径流量总体上呈增长趋势, 特别是 20 世纪 90 年代以后, 各源流普遍进入丰水期, 但河流在出山口后, 年径流量减少的趋势却趋于明显, 且沿程递减幅度增大。从影响因素看, 以气温上升和降水增加为特征的气候变化是源流径流量总体增长的主要影响因素, 其中气温变化对流域蒸发的影响并不显著, 但气温升高使冰川融水径流补给增长明显; 降水增加对各源流径流变化的影响存在差异, 可能与径流的补给类型有关。从流域整体看, 人类活动是造成流域径流变化的主导性因素。水利工程的修建和水资源取用量增加极大地改变了流域的径流过程, 塔里木河流域综合治理工程的实施对流域径流恢复产生了积极的正面影响。

关键词: 年径流过程; 气候变化; 人类活动; 塔里木河
文献标识码: A 文章编号: 1000-288X(2010)04-0099-05 中图分类号: S157, TV121

Runoff Change and Its Influencing Factors Under Changing Environment in Tarim River

WANG Qi-meng[1,2], ZHANG Jie-bin[1], FU Yi-cheng[3]
(1. *Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi, Xinjiang* 830011, *China*;
2. *Graduate School of the CAS, Beijing* 100049, *China*; 3. *Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research Institute, Beijing* 100044, *China*)

Abstract: Through the analysis of nearly 50 year annual runoff data of Tarim River, the evolution trend of runoff under changing environment is investigated. Possible impacts on the runoff process are discussed in the two aspects of climate change and human activities. Results show that under changing environment, the runoff process of Tarim River in nearly 50 years has been significantly changed. Under the influence of climate change characterized by temperature rising and precipitation increasing, runoff in headstream zone of Tarim River generally has an obvious increasing tendency. Temperature variation has little effect on regional evapotranspiration, but increases glacial meltwater runoff. There are some differences in the effect of precipitation increasing runoff among different headstream zones of Tarim River. However, human activities are the dominant influencing factor to runoff changes. The construction of hydraulic engineering and the increased amount of water use have significantly changed the runoff process of Tarim River and comprehensive management engineering of Tarim River has positive effects on the whole basin.

Keywords: runoff process; climate change; human activity; Tarim River

流域水文过程变化是环境变化的结果, 环境变化主要受气候变化和流域内人类活动的影响[1]。以气温、降水变化等为主要特征的气候变化和以水土资源开发等为标志的人类活动的加剧越来越深刻地改变着流域环境, 在此影响下流域水循环及水量平衡发生了极大改变, 并产生一系列的水资源、水灾害和水环境问题, 表现为径流时空变化, 洪水过程改变, 地下水位下降, 生态系统退化等[1-2]。目前环境变化对流域

收稿日期: 2009-09-29 修回日期: 2009-12-24
资助项目: 国家科技支撑计划项目(2008BAB42B09-1); 联合国开发计划署(UNDP)农村水项目"干旱、半干旱地区流域水资源管理与生态恢复示范区建设"
作者简介: 王启猛(1984—), 男(汉族), 山东省泰安市人, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: qimengw@gmail.com。
通信作者: 张捷斌(1963—)男(汉族), 广东省梅县人, 研究员, 主要从事综合水资源管理研究工作。E-mail: zhangjb@ms.xjb.ac.cn。

水文过程的影响已成为国内外研究的重要课题。塔里木河流域(以下简称塔河流域)地处我国西北干旱区,为我国最大的内陆河流域,是典型的生态脆弱带和环境危机带,其特殊的自然地理条件决定了水在其社会经济发展、生态环境建设中的重要地位[3-4]。研究变化环境下流域水文过程演变,并探讨各环境因子对于流域水文循环的可能影响,对流域水资源评价、管理、规划等方面工作的开展具有重要意义。

1 研究区概况及资料来源

1.1 研究区概况

塔河流域是环塔里木盆地 9 大水系 114 条河流的总称,流域面积 1.02×10^6 km^2,多年平均地表水天然径流量 3.98×10^{10} m^3,主要由高山区冰雪融水和降水补给。塔河干流全长 1 321 km,自身不产流,历史上汇入干流的 9 大水系中车尔臣河、克里亚河、迪纳河、喀什噶尔河、开都—孔雀河、渭干河等相继与其失去地表水力联系。和田河只在每年的 7—9 月洪水期才有水量进入塔河;叶尔羌河在 1986—2003 年这 18 a 中,仅有 1994 年在洪水期有水补给塔河,其余 17 a 均无地表水输入塔河干流。目前,阿克苏河是汇入干流水量的主要补给来源,补给量占到 73.2%,而和田河、叶尔羌河仅占 23.2%和 3.6%[5]。

1.2 资料来源

本研究中塔河流域源流及干流年径流数据均为各水文站实测径流数据;气温和降水数据来源于《中国塔里木河治水理论与实践》;耕地变化数据等来源于《中国干旱区土地利用与土地覆被变化》。其它数据来源于相关文献,在文中均做了标注。

2 径流变化分析

近 50 a 来塔河源流出山口年径流量总体上呈增长趋势,三源流(阿拉尔站以上的阿克苏河、和田河和叶尔羌河)的年汇总径流量线性趋势系数为 0.67,四源流(包括三源流及开都河)趋势系数达 0.81(图 1)。特别是 20 世纪 90 年代以后,各源流普遍进入丰水期[5],除和田河在 1990s 年径流量与多年均值相比有小幅下降外,其余各源流年径流量在 1990s 和 2000s 以后均有不同程度的增加,其中阿克苏河和开都—孔雀河年径流量的变化趋势最为显著,2000—2005 年年径流量与多年平均相比增幅分别达 18.9% 和 25.2%。

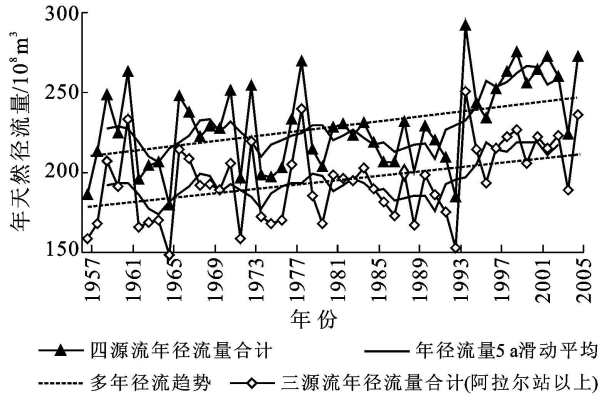


图 1 塔里木河源流 1957—2005 年径流量(合计)变化趋势

表 1 塔里木河源流出山口径流量及汇入干流水量统计 10^8 m^3

时段	水量	阿克苏河	叶尔羌河	和田河	开—孔河	三源流合计	四源流合计
1956-1959	出山口径流量	76.45	74.16	46.05	45.28	196.66	241.94
	汇入干流水量	34.37	2.82	13.08	0.00	50.27	50.27
1960-1969	出山口径流量	80.47	72.36	44.49	39.03	197.32	236.35
	汇入干流水量	36.98	2.42	12.28	0.00	51.68	51.68
1970-1979	出山口径流量	78.56	75.87	46.45	39.32	200.88	240.20
	汇入干流水量	31.16	2.23	11.82	0.00	45.21	45.21
1980-1989	出山口径流量	79.08	73.69	42.56	37.17	195.33	232.50
	汇入干流水量	33.67	0.306	10.75	1.521	44.73	46.25
1990-1999	出山口径流量	93.23	78.61	42.21	45.63	214.05	259.68
	汇入干流水量	34.06	0.268	8.21	2.296	42.54	44.83
2000-2005	出山口径流量	100.4	80.85	46.75	52.83	228.00	280.83
	汇入干流水量	31.31	0.512	10.30	3.92	42.12	46.05

但是,河流在出山口后,年径流量减少的趋势却特别明显,且沿程递减幅度加大。

由表 1 分析可知,各源流汇入干流的水量总体上呈下降趋势,即使在 1990s 以后出山口径流量增加情况下,汇入干流的水量增加也不明显,甚至还有一定幅度的下降。例如,三源流汇入干流水量由 1950s 的 5.03×10^9 m^3 下降到 2000s 的 4.21×10^9 m^3。同时,干流各水文站实测年径流量同样呈显著下降趋势,阿

拉尔站线性趋势系数为- 0. 16, 英巴扎站为- 0. 36, 恰拉站为- 0. 23(图 2)。2000—2005 年在三源流来水比多年平均偏多2. 34× 10^9 m^3 情况下, 阿拉尔站年径流量却比多年平均来水量减少了 1. 25× 10^8 m^3, 英巴扎站减少更是达 6. 39× 10^9 m^3。

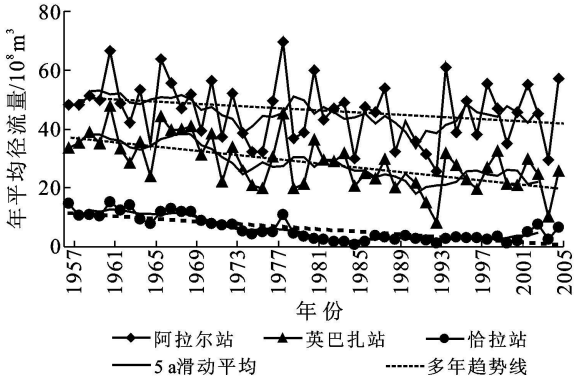


图 **2**　塔里木河干流水文站 **1957**—**2005** 年径流量变化

3　径流变化影响因素分析

在气候变化和人类活动的影响下, 流域径流情势发生了显著变化, 但两者对水资源系统影响的相关性较强, 气候变化下自然条件的改变会影响人类对水资源的利用, 同时土地利用变化等人类活动也会不同程度的对气候系统产生影响, 两者的影响很难明确区分。本研究分因子从两者的直接影响出发, 暂不考虑其间的耦合关系。

3. 1　气候变化影响

气候系统通过降水、气温等因子直接或间接地影响着流域水循环过程[6]。在干旱地区, 水资源系统尤其容易受到气候变化影响, 全球变暖及大气环流的改变影响着高山区冰川消融和降水形态, 同时改变了流域的总蒸发量[7-9]。塔河流域以高山冰川和山区降水为主要补给来源, 因此山区气温和降水是影响流域径流变化最重要的环境因素[5]。

3. 1. 1　气 温　气温变化对流域蒸散发、高山区冰川消融影响较大。相关研究表明[7, 10-11], 近 50 a 来塔河流域年平均气温变化具有明显的增加趋势, 且阶段转换特征显著, 在 20 世纪 80 年代末到 90 年代初发生跳跃。其中, 流域源流山区气温增加的趋势表现更为显著, 图 3 反映的是流域主要站点年平均气温的年际变化情况。从图中可以看出, 各站点年均气温总体上呈增长趋势, 1990 年代和 2001—2005 年的平均值大都高于多年平均气温 0. 4 ℃~ 1. 5 ℃。

蒸发是反映气候变化影响地区水资源的重要因素。目前气候变化对流域蒸发量的影响存在争议。苏宏超[13]等研究认为气温上升背景下新疆蒸发量大体上呈下降趋势, 其中塔河流域所在的南疆地区下降幅度为 13. 4 mm/ a。蒋艳等[9]则认为在气温上升情境下源流区内蒸发量呈增加趋势, 且径流对气温和蒸发量变化较为敏感。但蒸发量变化对径流的影响相对较小。

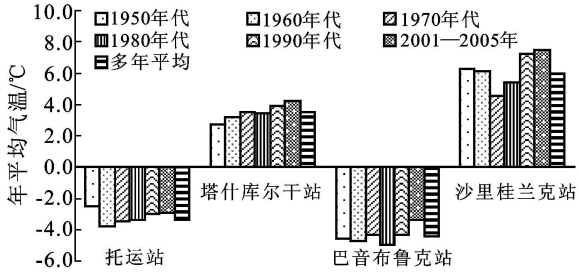


图 **3**　塔里木河流域时段平均气温变化统计[17]

高山冰雪融水在塔河流域径流补给中占较大比重。从源流产流角度看, 气温升高会使冰川退缩和物质负平衡持续, 河流冰川融水径流补给增长[14]。近期气候暖湿变化在冰川径流变化中得到了很好体现。在 1981 年以来的两个 10 a 中冰川径流深高出多年平均 14. 9 mm (4. 5%)和 22. 6 mm (6. 9%)。1990 年代冰川径流增加占出山径流增加的 1/ 3, 而 1980s 出山径流表现偏少情况下, 冰川径流却处于增加趋势, 说明冰川退缩对河川径流增加的影响不断加强[16]。但从长期看由于大部分冰川面积较小且分布在低海拔的山坡, 易于融化退缩, 甚至消失, 会使冰川融水量突然减少, 减弱对河川径流的调节, 且使河流水量明显减少[15]。

3. 1. 2　降 水　降水是径流产生的重要因素。以往研究通过分析流域近 50 a 的平均降水变化, 认为降水具有与气温相似的变化趋势, 同样在 20 世纪 80 年代中后期到 90 年代初发生跳跃, 之后呈现显著的增加态势[7, 10-11]。图 4 反映的是塔河流域主要站点年平均降水的年际变化情况。总体上看, 各站点在 1980s 以前年均降水量呈下降趋势, 在 1980 年代以后降水量增长显著, 其中塔什库尔干站和沙里桂兰克站在 2001—2005 年的年均降水量的距平比达 30. 3% 和 42. 7%。

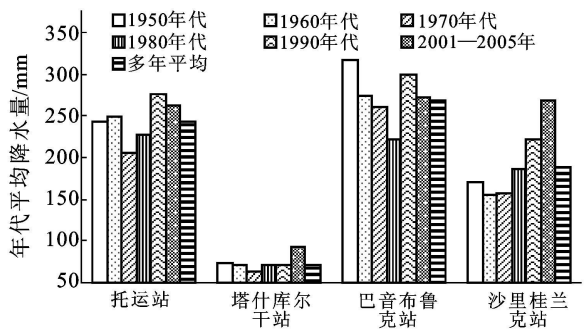


图 **4**　塔里木河流域时段平均降雨量变化统计

但是, 降水增加对塔河流域径流变化效应的研究目前还存在争议。吴素芬等[16] 利用投影回归模型分析认为当降水量增加时, 径流量会因降水增加导致温度降低而出现下降。徐海量等[17] 对源流区降水和径流变化的趋势进行长序列分析, 认为降水和径流变化呈现一定的关联性, 其中阿克苏河、开都河的径流增加与降水变化趋势一致性显著, 但和田河、叶尔羌河在同样检验水平上变化趋势不一致。本研究认为显著性的差异可能与河流补给类型有关。前者以降水补给为主, 而和田河和叶尔羌河补给来源中冰川融水占有更大比重(表 2) 。可见, 与以冰川融水补给为主的河流相比, 降水补给为主河流的降水与径流变化趋势的关系显著性要更强些。

表 **2** 塔里木河主要源流径流组成统计

水 系	河 流	径流构成/ %		
		冰川融水	降水(雨雪混合)	地下水
和田河	玉龙喀什河	64. 9	17. 0	18. 1
	喀拉喀什河	54. 1	22. 1	23. 8
叶尔羌河	叶尔羌河	64. 0	13. 4	22. 3
阿克苏河	昆马力克河	52. 4	30. 4	17. 2
	托什干河	24. 7	45. 1	30. 2
开都—孔雀河	开都河	15. 2	44. 0	40. 8

3. 2 人类活动影响

3. 2. 1 *水资源利用量* 塔河流域以绿洲农业经济为主, 农业用水量占总用水量的 97% 以上。自 1960 年以来流域各区域耕地面积均有不同程度的增长, 其中源流区的阿克苏河、开—孔河流域以及干流区耕地面积增长最为显著, 增幅分别达 57. 48%, 95. 16%, 62. 26%[18]。在一定条件下, 径流的河道自然损耗量是相对稳定的。图 5 反映干流上游区间耗水量从 1956—2005 年呈上升趋势, 表明随着耕地面积的增加, 水资源利用量相应增长。但是, 由于灌溉基础设施的完善和灌溉管理制度的改革(自主管理灌区制度实施等) , 流域水资源利用效率逐步提高, 大体经历 3 个阶段: 大规模开发利用阶段, 开发利用稳定增加阶段, 高效协调利用阶段[19]。其中, 源流灌区的灌溉面积从 1950 年的 2.32×10^4 hm^2 增加到 2000 年的 8.38×10^4 hm^2, 增长了 2. 6 倍, 而灌区相应用水量从 5.00×10^9 m^3 增加到 1.55×10^{10} m^3, 增长了 2. 1 倍。水资源量利用量增幅低于耕地面积的增幅[3]。

3. 2. 2 *水利工程* 塔里木河流域水利工程设施主要有引水渠首、水库工程、渠系工程等。据统计, 目前流域已修建各类平原水库 76 座, 总库容 2.81×10^9 m^3, 有效灌溉面积 3.65×10^5 hm^2; 已建成各类引水渠首 286 处, 总设计引水能力 882 m^3/s, 现状供水能力 765 m^3/s; 干、支、斗三级渠道总长度 4. 85 km[20]。目前流域水利工程存在的问题比较突出, 水利工程组合结构和总体布局不完善, 主要表现为: 水利工程数量少, 规模小, 绝大多数河流尚缺乏调蓄控制工程; 现有水库中除乌鲁瓦提水库外, 均为平原水库, 水库水量损失大、周边盐碱化严重、调蓄能力有限; 现有水利工程老化失修, 临时性工程多, 建设标准低, 配套不完善, 等。各种水利工程对流域河流径流过程产生了不同程度的影响。以平原水库为例, 水库修建后各河流的引水率达 75. 0% 以上, 远超过国际上河流引水率低于 50% 的要求[21]。同时, 平原水库由于其水深浅, 水面面积大, 且建设标准低, 蒸发渗漏损失水量较大, 仅干流现有的 8 座平原水库每年水库损失水量就达 4.16×10^8 m^3。

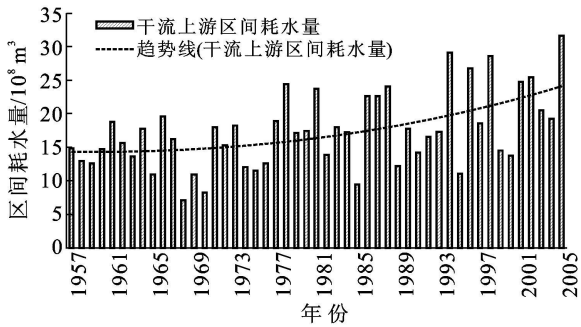


图 **5** 塔里木河干流上段区间耗水量变化统计

3. 2. 3 *流域综合治理工程* 塔河流域综合治理工程是通过源流灌区工程改造、干流河道治理、流域水资源统一管理和调度等措施的实施, 增加了各源流汇入塔里木河的水量, 使干流上中游林草植被得到有效保护和恢复, 下游生态环境得到初步改善[22]。工程的实施在缓解流域生态用水需求的同时, 也改变了原有地表水资源的时空分布特征。以其中的“流域水权管理制度”建立和“下游生态应急输水工程”实施进行实例说明。

塔河流域水权管理制度的建立合理界定了源流与干流的水权分配方案, 对源流严格采取总量控制和定额用水管理制度, 确保干流来水的量和质[23]。依据塔里木河流域《近期综合治理规划》和《“四源一干”地表水水量分配方案》, 渐近初始水权, 取得了初步成效, 但距规划目标尚有一定距离, 源流来水仍偏离初始水权, 均不同程度的挤占了干流水量(表 3) 。

塔河下游生态应急输水工程是利用开都河来水连续偏丰的有利时机, 从博斯腾湖向下游应急生态调水。该工程自 2000—2006 年共完成了 8 次生态应急输水, 从大西海子水库向下游河道输水达 2.28×10^9

m^3, 输水至台特玛湖[25]。但该工程之所以能实施主要是由于开都河长期处于丰水期, 博斯腾湖处于高水位。在平枯水期, 特别是长时段枯水期, 能否实现持续输水值得关注。根据现状来水和用水条件计算, 博斯腾湖向塔河下游输水 4.50×10^8 m^3 的风险率达到 91.72%, 因此维持现行生态输水方式的可能性很小[24-25]。

表 3　塔河三源流初始水权与实际来水对比　　10^8 m^3

水文时段	阿克苏河下泄水量		和田河下泄水量		叶尔羌河下泄水量	
	实测值	水权分配值	实测值	水权分配值	实测值	水权分配值
199810—199909	46.79	46.52	9.67	9.06	0.30	6.21
199910—200009	26.62	42.75	7.95	11.18	0	5.03
200010—200109	32.23	42.61	13.50	15.74	0	5.49
200110—200209	43.92	47.46	9.13	7.66	0	1.98
200210—200309	31.00	45.98	13.33	14.76	0	2.90
200310—200409	28.43	42.21	2.30	6.30	0	2.90
200410—200509	34.11	45.00	17.48	16.20	2.54	6.80

注: 阿克苏河下泄水量实测值是拦河闸下泄和区间回归水量之和[23]。

4　结 论

(1) 变化环境下塔河流域的径流过程发生了显著变化。近 50 a 来源流出山口年径流量总体上呈增加的趋势, 特别是 1990s 以后各源流普遍进入丰水期。但在出山口以后年径流量却呈显著下降趋势, 且沿程递减幅度加大。各源流汇入干流水量总体上呈下降趋势, 同时, 塔河干流各水文站实测年径流量同样呈显著下降趋势。

(2) 塔河源流出山口径流量增加是气温和降水变化共同作用的结果。气温变化对流域蒸发的影响并不显著, 但气温升高使河流冰川融水径流补给增长明显; 降水增加对各源流径流变化的影响有差异, 可能与径流的补给类型有关, 以冰川消融和永久积雪补给为主的河流径流变化与气温变化关系密切, 以降水补给为主的河流径流则与降水变化的关系更为显著。

(3) 人类活动是影响流域径流变化的主导性因素。水利工程建设和水资源取用量增加使流域径流量不断减少, 甚至造成下游长时间断流。为拯救干流下游濒临毁灭的生态系统, 实施了塔河综合治理工程, 工程的实施一定程度上改变了地表径流的时空分布, 增加了下游的径流量, 但未从根本上解决问题。

(4) 塔河流域径流变化是一个多层次、多因素的复杂性系统问题, 探讨变化环境下气候变化和人类活动对流域径流过程的影响, 并区分两者各因子的影响程度是相当困难的。本研究分因子仅从其对径流过程的可能直接影响进行了分析, 要全面评估气候变化和人类活动对流域水文水资源的影响, 并研究其对源流(产流区)和干流(耗散区)径流的不同作用效果还有待进一步的深入研究。

[参 考 文 献]

[1] 王国庆, 张建云, 贺瑞敏. 环境变化对黄河中游汾河径流情势的影响研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(6): 853-858.

[2] 李恒鹏, 杨桂山, 金洋. 太湖流域土地利用变化的水文响应模拟[J]. 湖泊科学, 2007, 19(5): 537-543.

[3] 叶茂, 徐海量, 宋郁东. 塔里木河流域水资源利用及其变化趋势分析[J]. 科学通报, 2006, 51(S): 14-20.

[4] 石丽, 吐尔逊·哈斯木, 韩桂红. 塔里木河下游生态输水的背景、效益和存在的问题[J]. 2008, 21(1): 176-180.

[5] 郝兴明, 陈亚宁, 李卫红. 塔里木河流域近 50 年来生态环境变化的驱动力分析[J]. 地理学报, 2006, 61(3): 262-272.

[6] 刘昌明. 黄河流域水循环演变若干问题的研究[J]. 水科学进展, 2004, 15(5): 608-614.

[7] 陈亚宁, 徐宗学. 全球气候变化对新疆塔里木河流域水资源的可能性影响[J]. 中国科学(D 辑), 2004, 34(11): 1047-1053.

[8] 陈亚宁, 郝兴明, 徐长春. 新疆塔里木河流域径流变化趋势分析[J]. 自然科学进展, 2007, 17(2): 205-210.

[9] 蒋艳, 夏军. 塔里木河流域径流变化特征及其对气候变化的响应[J]. 资源科学, 2007, 29(3): 45-52.

[10] 杨青, 何青. 塔里木河流域的气候变化、径流量及人类活动间的相互影响[J]. 应用气象学报, 2004, 14(3): 309-321.

[11] 邓铭江. 塔里木河流域气候与径流变化及生态修复[J]. 冰川冻土, 2006, 28(5): 694-702.

[12] 满苏尔·沙比提, 楚新正. 近 40 年来塔里木河流域气候及径流变化特征研究[J]. 地域研究与开发, 2007, 26(4): 97-101.

[13] 苏宏超, 魏文寿, 韩平. 新疆近 50 a 来的气温和蒸发变化[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 174-178.

[14] 高前兆, 王润, Ernst G. 气候变化对塔里木河来自天山的地表径流影响[J]. 冰川冻土, 2008, 30(1): 1-11.

(下转第 109 页)

以及土壤中好氧微生物的活动也影响元素在土壤中的垂直分布特征。

(3) 不同植被群落土壤中磷的垂直变异性很小, 除 E 群落(16.5%)属中等变异外, 其余群落中均为弱变异性(> 10%), 这与研究区域土壤不同土层的成土母质差异不大有关; 硫元素在不同土层有较高的垂直变异性, 除 C 群落(7.4%)和Ⅰ群落(7.55%)属于弱变异性, 其余植被群落下均属于中等变异性(< 10%), 这可能与上下土层影响硫分布的主导因素差异有关。

(4) 不同植被群落土壤的磷储量及其分布状况差异不大, 不同土壤的磷储量均在 0.32 kg/m^2(0—60 cm) 附近波动; 而不同土壤中硫储量存在较大差异, 沿演替方向呈"S"型波动变化, 最高值出现在 H 群落(0.325 kg/m^2, 0—60 cm), 最低值出现在演替末期(0.168 kg/m^2, 0—60 cm), 但其分布状况差异不大。

[参 考 文 献]

[1] Thornton S F, McManus J. Application of organic carbon and nitrogen stable isotope and C/N ratios as source indicators of organic matter provenance in estuarine systems: Evidence from the Tay Estuary, Scotland Estuarine[J]. Coastal and Shelf Science, 1994, 38(3): 219-233.

[2] Tanner C C, D' Eugenio J, McBride G B, et al. Effect of water level fluctuation on nitrogen removal from constructed wetland mesocosms[J]. Ecological Engineering, 1999, 12(1): 67-92.

[3] 丁秋祎, 白军红, 高海峰, 等. 黄河三角洲湿地不同植被群落下土壤养分含量特征[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(10): 2092-2097.

[4] 白军红, 邓伟, 王庆改, 等. 内陆盐沼湿地土壤碳氮磷剖面分布的季节动态特征[J]. 湖泊科学, 2007, 19(5): 599-603.

[5] 郗金标 宋玉民 邢尚军, 等. 黄河三角洲生态系统特征与演替规律[J]. 东北林业大学学报, 2002, 30(6): 111-114.

[6] 侯本栋, 马风云, 邢尚军, 等. 黄河三角洲不同演替阶段湿地群落的土壤和植被特征[J]. 浙江林学院学报, 2007, 24(3): 313-318.

[7] 孙志高, 刘景双. 三江平原典型小叶樟湿地土壤氮的垂直分布特征[J]. 土壤通报, 2009, 40(6): 1342-1347.

[8] 全为民, 韩金娣, 平先隐, 等. 长江口湿地沉积物中的氮、磷与重金属[J]. 海洋科学, 2008, 32(6): 98-102.

[9] 王爱萍. 长江口滨海湿地磷的迁移转化及净化功能的研究[D]. 上海: 同济大学, 2005.

[10] 陈海霞, 付为国, 王守才, 等. 镇江内江湿地植物群落演替过程中土壤养分动态研究[J]. 生态环境, 2007, 16(5): 1475-1480.

[11] 于海涛, 魏江生, 周梅, 等. 兴安落叶松林林下冻土中硫元素分布规律研究[J]. 内蒙古农业大学学报, 2006, 27(4): 73-77.

[12] 杨力, 刘光栋, 宋国菡, 等. 山东省土壤有效硫含量及分布[J]. 山东农业科学, 1998(2): 3-6.

(上接第 103 页)

[15] 刘时银, 丁永建, 张勇, 等. 塔里木河流域冰川变化及其对水资源影响[J]. 地理学报, 2006, 61(5): 482-490.

[16] 吴素芬, 韩萍, 李燕, 等. 塔里木河源流水资源变化趋势预测[J]. 冰川冻土, 2003 25(6): 708-711.

[17] 徐海量, 叶茂, 宋郁东. 塔里木河流域水文过程的特点初探[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 156-170.

[18] 陈曦. 中国干旱区土地利用与土地覆被变化[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 110-116.

[19] 周宏飞, 张捷斌. 新疆的水资源可利用量及其承载能力分析[J]. 干旱区地理, 2005, 28(8): 756-763.

[20] 胡安焱. 干旱地区内陆河的水文生态特征及其水资源的合理开发利用研究: 以塔里木河为例[D]. 陕西西安: 长安大学, 2003: 103-110.

[21] 郝兴明, 李卫红, 陈亚宁, 等, 塔里木河干流年径流量变化的人类活动和气候变化因子甄别[J]. 自然科学进展, 2008, 18(22): 1409-1416.

[22] 新疆维吾尔自治区人民政府, 中华人民共和国水利部. 塔里木河流域近期综合治理规划报告[R]. 北京: 中国水利水电出版社出版, 2002: 18-20.

[23] 王世江. "水权塔河"体制绩效与未来远景[J]. 干旱区地理, 2007, 30(3): 328-336.

[24] 邓铭江. 中国塔里木河治水理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 453-454, 486-493.

[25] 夏军, 陈曦, 左其亭. 塔里木河河道整治与生态建设科学考察及再思考[J]. 资源科学, 2008, 23(5): 745-753.