

# 基于相似年降水的人类活动对延河水沙变化影响

王群星<sup>1</sup>, 李锐<sup>1,2</sup>, 王飞<sup>1,2</sup>, 高鹏<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 定量评价人类活动对河流径流和泥沙的影响是目前地学研究热点之一。由于河流水沙变化受人类活动和气候变化共同作用,降水是径流的来源和产沙输沙的主要动力。通过选择降水条件相似的年份,比较河流水沙差异,可以反映人类活动对水沙变化的作用大小。利用1952年到2001年延河甘谷驿水文站逐月径流量、输沙量实测值和流域逐月降水量实测资料,通过分析和确定年、汛期降水量和年内降水过程相似的年降水条件相似年组,比较相似年降水条件下径流量和输沙量的差异。分析表明,与1954—1963年相比,延河1969—1977年年和汛期径流量分别减少18.03%和32.52%,输沙量分别减少47.08%和47.52%;1981—1984年年和汛期径流量分别减少29.77%和46.29%,输沙量均减少73.46%;1988—1996年年和汛期径流量分别增加71.72%和97.79%,输沙量分别增加162.07%和161.88%。

**关键词:** 人类活动; 年降水相似年组; 径流量; 输沙量; 延河

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)03-0016-05

中图分类号: P333.5

## Impact of Human Activities on Runoff and Sediment Change of Yanhe River Based on the Similar Precipitation Condition

WANG Qur xing<sup>1</sup>, LI Rui<sup>1,2</sup>, WANG Fei<sup>1,2</sup>, Gao Peng<sup>1,2</sup>

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** The impact of human activities on runoff and sediment change is one of the key topics worldwide. Runoff and sediment change is interactively affected by climate change and human activities. The impact of human activities on runoff and sediment change is analyzed based on the similar precipitation condition (SPC) because precipitation is the source of runoff and the power of soil erosion and sediment delivery in the Yanhe River. In the paired periods with SPC, the depth and process of precipitation are similar. A 50-year data series (1952—2001) of annual precipitation in the basin and runoff and sediment at Ganguyi Hydrology Station of the Yanhe River are analyzed. Results show that there are clear stages of runoff and sediment change influenced by human activities in the SPC. Compared with the period from 1954 to 1963, runoff in annual and flood seasons from 1969 to 1977 is reduced by 18.03% and 32.52%, and sediment, by 47.08% and 47.52%, respectively; from 1981 to 1984, runoff is reduced by 29.77% and 46.29%, respectively, and sediment in both cases, by 73.46%; and from 1988 to 1996, runoff in annual and flood seasons is reduced by 71.72% and 97.79% and sediment, by 162.07% and 161.88%, respectively.

**Keywords:** human activity; paired-period with similar precipitation condition; runoff; sediment discharge; Yanhe River

气候变化和人类活动是影响河流水沙变化的主导因素<sup>[1]</sup>,如何定量评价人类活动的影响是目前地学研究的热点和难点。按照评价原理不同,现有的流域

水沙研究方法可分为对比分析和模拟分析两大类<sup>[2]</sup>。时序对比分析法以同一流域为研究对象,以实测资料为基础,分析实行水土流失治理前后的水沙变化特

收稿日期: 2010-01-09

修回日期: 2010-02-25

资助项目: 西北农林科技大学留学归国人员科研专项“延河流域水土保持生态服务价值评价”(01140405); 欧盟项目“土地荒漠化防治与修复”(DESIRE, 037046); 中国科学院“西部之光”人才培养计划“基于水保措施减水减沙比分离规律的河道水沙调控对策”(2005XB01)

作者简介: 王群星(1984—),男(汉族),山东省海阳市人,硕士研究生,研究方向为地理信息系统在水土保持中的应用。E-mail: star.and.pig@163.com。

通信作者: 王飞(1971—),男(汉族),陕西省户县人,博士,副研究员,从事水土保持环境效应评价研究。E-mail: wafe@ms.iswc.ac.cn。

征,但是严格地讲,治理前后不同时期降水等因素的影响是完全不同的,在分析时应该消除其影响<sup>[3]</sup>。对中大流域,模拟分析法是目前最常用的分析方法,该方法基于对降水产流产沙基本规律的分析,建立有一定精度的治理前流域产流产沙模型,然后将水土流失治理后期的降水等代入,还原计算得到相当于治理前的产流产沙量,再与治理后的实测水沙量比较求得水土保持措施对水沙的影响量。但是由于这两类传统方法所依据的基准期(治理前后的临界年份)确定时主观因素较多,而且以年份划分水沙变化时段时降水量并没有相应的阶段性,难以体现出时段内的降水量变化,从而极大地影响了评价结果<sup>[4]</sup>。

在黄土高原水蚀区,降水是径流的来源和侵蚀产沙的动力。延河流域年内降水高度集中,其6—9月的汛期降水量和径流量分别占年总量的75%和73%以上<sup>[5]</sup>。通过比较相似年降水条件下河流水沙变化特征,可以判别类型多样而且变化复杂的人类活动对水沙变化的影响。本文通过选择年、汛期降水量和年内降水过程均相似的年降水条件相似时段组,比较产流和产沙前提条件一致条件下径流量和输沙量的变化,直接推算出人类活动对延河水沙变化的影响,从而减少人为主观划分时段对评价结果的影响,客观区分以降水量为代表的自然因素与人类活动对河流水沙变化的影响大小与方向。

## 1 研究流域、资料与方法

### 1.1 流域概况

延河是黄河中游的一级支流,发源于陕西省靖边县天赐湾乡的周山,由西北向东南,流经靖边县、安塞县、宝塔区、延川县和延长县5个区县的50个乡镇,在延长县南河沟乡凉水岸附近汇入黄河。延河全长284.3 km,河道平均比降为3.29‰,主要支流有杏子河、西川、蟠龙川和南川等。

延河流域地处北亚热带半干旱地区,位于36°23′—37°17′ N, 108°45′—110°28′ E之间,流域总面积7 725 km<sup>2</sup>,多年平均降水量为504.8 mm,年平均气温9℃。流域内黄土丘陵沟壑面积占全流域的90%,其中延长以上为黄土梁峁状丘陵沟谷区,安塞—延长之间沿河一带河流阶地发育,延长以下为黄土宽梁残塬沟谷区,流域出口处为黄土覆盖石质丘陵沟谷区,黄绵土占总土地面积的85%以上。

延河甘谷驿水文站为控制站。甘谷驿水文站位于陕西省延安市宝塔区甘谷驿镇(109°48′ E, 36°42′ N),控制面积5 891 km<sup>2</sup>,占延河流域总面积的76.3%。

### 1.2 资料与方法

本研究采用1952—2001年50 a的延河甘谷驿水文站逐月径流量、输沙量实测值和流域逐月降水量实测资料。

按照时序对比分析方法<sup>[6]</sup>,相似降水条件分析包括降水量相似年组和降水过程相似年组的确定。降水量相似年组的确定主要考虑汛期和年降水量,根据汛期降水量差异小于4%和年降水量差异小于7%这2个指标选取降水量相似年组。

在确定降水过程相似年组时,本研究未考虑次降水动能特征,通过分析降水量相似年组内两组逐月降水量数据的相关系数,确定两组降水过程的相似程度。由于同一相似年组内两组数据的和大致相等(年降水量相似),当两组数据相关系数越接近1,则2组降水过程越相似。由于地学问题的复杂性,本文把12个月降水量数据相关系数 $\geq 0.3981$ 的2组降水过程作为一个降水条件相似年组。

每个相似年组中两个特征值(径流量和输沙量)的变化用晚些时段特征值较早些时段特征值的变化百分比表示。当变化趋势为正值时,表示随着时间推移,产流系数和输沙量增加;反之表示产流系数和输沙量减少<sup>[6]</sup>。

在分析不同年组特征时,根据降水条件相似年的特征逐步比较,提出在相似年比较结果下的阶段性。由于土地利用变化对降水产流产沙逐渐过渡影响,因此分段时可以认为在接近的年份(年差 $\leq 3$  a)土地利用变化对降水产流产沙的影响没有差异。

## 2 结果分析

### 2.1 降水量、径流量和输沙量变化特征

延河甘谷驿水文站基本水文泥沙变化与统计特征值见表1—2和图1。

从1952—2001年的50 a中,流域平均年降水量504.8 mm,河流平均年径流量 $2.12 \times 10^8$  m<sup>3</sup>,平均年输沙量 $4.65 \times 10^7$  t。从极值差、变异系数看,延河各水文要素年际变化较大。

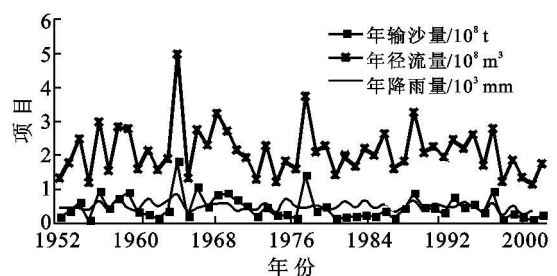


图1 延河逐年降水与水沙变化

延河流域各年代之间平均年降水量差异较大(见表 2),各年代内年降水量差值也较大,最大值在 285.7~492.5 mm 之间,  $C_v$  值也高达 0.230~0.269,可见年降水量没有相应的阶段性,以年代划分水沙变化时段难以体现出时段内的降水量变化。传统的水沙研究方法是以前年代划分水沙变化时段,从而极大影响了评价结果<sup>[4]</sup>。

表 1 延河流域水文泥沙特征统计

项目	平均值	最大值	最小值	$C_v$
年降水量/mm	504.80	853.70	259.90	0.253
年径流量/ $10^6 m^3$	212.24	497.01	114.79	0.339
年输沙量/ $10^6 t$	46.48	181.56	7.89	0.756

表 2 延河流域各年代年降水特征统计

时间段	平均值/	最大值/	最小值/	$C_v$
	mm	mm	mm	
1952—1959	495.8	694.6	390.4	0.230
1960—1969	570.2	853.7	361.2	0.266
1970—1979	480.9	604.7	319.0	0.244
1980—1989	512.5	684.1	355.2	0.236
1990—1999	475.5	632.2	259.9	0.269

表 3 延河流域年降水条件相似年份年均水沙变化

组号	相似年组			年均径流量/ $10^4 m^3$				年均输沙量/ $10^4 t$			
	年 1	年 2	Sig.	年 1	年 2	变化	变幅/%	变幅/%	年 1	年 2	变化
1	1960	1972	0.020	16 185.06	12 956.04	-3 229.02	-19.95	3 240.65	1 938.40	-1 302.25	-40.18
2	1957	1972	0.100	15 444.76	12 956.04	-2 488.72	-16.11	4 212.07	1 938.40	-2 273.67	-53.98
3	1954	1982	0.001	24 876.65	16 748.24	-8 128.40	-32.67	6 064.95	1 921.58	-4 143.37	-68.32
4	1956	1981	0.010	29 788.38	19 620.65	-10 167.73	-34.13	9 184.42	1 685.87	-7 498.55	-81.64
5	1958	1983	0.050	28 421.82	22 030.52	-6 391.30	-22.49	7 285.42	2 155.80	-5 129.62	-70.41
6	1955	1989	0.050	11 967.91	20 732.29	8 764.38	73.23	1 644.99	4 506.10	2 861.11	173.93
7	1963	1988	0.150	19 165.74	32 621.36	13 455.62	70.21	3 488.71	8 729.10	5 240.39	150.21
8	1977	1984	0.001	37 399.07	20 054.27	-17 344.80	-46.38	14 024.65	2 007.07	-12 017.58	-85.69
9	1973	1996	0.150	22 834.69	27 906.73	5 072.04	22.21	4 617.06	9 174.49	4 557.43	98.71
10	1969	1996	0.200	27 136.73	27 906.73	770.00	2.84	8 724.00	9 174.49	450.49	5.16

表 4 延河流域年降水条件相似年份汛期水沙变化

组号	相似年组			汛期径流量/ $10^4 m^3$				汛期输沙量/ $10^4 t$			
	年 1	年 2	Sig.	年 1	年 2	变化	变幅/%	变幅/%	年 1	年 2	变化
1	1960	1972	0.020	10 967.44	7 410.68	-3 556.76	-32.43	3 235.48	1 919.20	-1 316.28	-40.68
2	1957	1972	0.100	10 995.73	7 410.68	-3 585.05	-32.60	4 205.42	1 919.20	-2 286.22	-54.36
3	1954	1982	0.001	20 460.68	9 972.56	-10 488.11	-51.26	6 064.34	1 918.00	-4 146.34	-68.37
4	1956	1981	0.010	24 870.60	13 547.04	-11 323.57	-45.53	9 175.30	1 685.87	-7 489.43	-81.63
5	1958	1983	0.050	22 686.79	13 139.88	-9 546.91	-42.08	7 206.93	2 134.90	-5 072.03	-70.38
6	1955	1989	0.050	6 395.45	12 169.60	5 774.15	90.29	1 628.51	4 458.48	2 829.97	173.78
7	1963	1988	0.150	12 814.69	26 306.21	13 491.52	105.28	3 484.70	8 711.00	5 226.30	149.98
8	1977	1984	0.001	30 999.02	12 246.27	-18 752.76	-60.49	14 024.65	2 006.60	-12 018.05	-85.69
9	1973	1996	0.150	16 613.89	22 358.95	5 745.06	34.58	4 600.36	9 174.49	4 574.13	99.43
10	1969	1996	0.200	18 943.11	22 358.95	3 415.84	18.03	8 724.00	9 174.49	450.49	5.16

## 2.2 相似年降水条件下水沙变化特征

相似降水年组内的年降水条件的差异很小,可认为产流和产沙的前提条件基本一致。在此基础上比较分析不同的相似年组(表 3—4),无相似降水的年份与最接近的相似年组合并,将延河水沙变化分段(表 5)。由于是根据相似降水年组分段,所以各时段不能包括所有年份。根据各时段相似降水年组水沙变化特点,直接推算人类活动对延河水沙变化的影响。

相似年降水条件下,人类活动造成延河水沙变化差异显著。从时段 I 到时段 II 的 2 个相似年组径流量和输沙量都呈减少趋势(组 1—2),1972 年比 1957 年年和汛期径流量分别减少 16.11% 和 32.60%,输沙量分别减少 53.98% 和 54.36%;比 1960 年年和汛期径流量分别减少 19.95% 和 32.43%,输沙量分别减少 40.18% 和 40.68%。

从时段 I 到时段 III 的 3 个相似年组径流量和输沙量都呈减少趋势(组 3—5),年和汛期径流量平均分别减少 29.77% 和 46.29%,输沙量分别减少 73.46% 和 73.46%。

表5 延河流域水沙变化阶段

起止年份	年数/ a	分段
1954—1963	10	I
1969—1977	9	II
1981—1984	4	III
1988—1996	9	IV

从时段 I 到时段 IV 的 2 个相似年组径流量和输沙量都呈增加趋势(组 6—7), 1989 年比 1955 年年和汛期径流量分别增加 73.23% 和 90.29%, 输沙量分别增加 173.93% 和 173.78%; 1988 年比 1963 年年和汛期径流量分别增加 70.21% 和 105.28%, 输沙量分别增加 150.21% 和 149.98%。

从时段 II 到时段 III 的相似年组(组 8) 径流量呈减少趋势, 1984 年比 1977 年年和汛期径流量分别减少 46.38% 和 60.49%, 输沙量均减少 85.69%。

从时段 II 到时段 IV 的 2 个相似年组径流量和输沙量都呈增加趋势(组 9—10), 1996 年比 1969 年年和汛期径流量分别增加 2.84% 和 18.03%, 输沙量均增加 5.16%; 比 1973 年年和汛期径流量分别增加 22.21% 和 34.58%, 输沙量分别增加 98.71% 和 99.43%。

### 3 结果讨论

#### 3.1 降水条件相似时段组

在以往研究中以下几个因素会对评价结果的准确性产生巨大的影响。(1) 基准期的确定。因为推算人类活动影响下水文要素时序的显著转折点时, 基础数据和统计分析方法的选择都会影响分析判断的结果, 且基准期流域观测站点对降水量和降水强度的观测和记录很难保证降水产流产沙模型的要求。朱恒峰等<sup>[5]</sup>以汛期降水、径流数据建立模型, 最大限度地充分利用各汛期季节性雨量站点数据, 减弱黄土高原地区降水、径流变化幅度巨大的干扰, 反映了人类活动对研究区汛期径流的影响, 但是却无法估算人类活动对流域水沙在年甚至多年时间尺度上的影响程度。(2) 在不同阶段暴雨的多少和强度的大小是不同的, 因而产沙量也是不同的。由于降水产沙模型多是用暴雨多, 强度大的 20 世纪 50—60 年代为基准期的雨沙资料建立起来的, 因此存在系数、指数偏大的问题<sup>[7]</sup>。(3) 分段主要以自然时间为主<sup>[9-11]</sup>, 但气象水文要素并没有以年代为周期的阶段性<sup>[8-9]</sup>。王飞等<sup>[4]</sup>据河流含沙量将水沙变化过程分段, 较好地反映了不同径流和泥沙量的时段持续性特征, 但不同时间段的降水量差别较大, 从而影响了不同治理时段径流量和输沙

量计算的准确性。(4) 一个流域可能包括很多的侵蚀类型区。在相同的流域面平均降水量情况下, 不同侵蚀类型区会产生不同的径流量和输沙量。因此, 公式计算的数值和实际产流产沙量有一定的差距<sup>[10]</sup>。

本研究通过选择年和汛期的降水量和年内降水过程均相似的降水条件相似年组, 分析相似年降水条件下延河年和汛期的水沙变化特征, 直接推算人类活动对延河水沙变化的影响。

#### 3.2 人类活动对延河年和汛期水沙变化的影响

降水因素和人类活动改变土地利用所引起的地表景观格局的变化往往是影响流域水沙关系的主导因素<sup>[1]</sup>。因此在本研究中, 人类活动成为引起相似降水条件下延河径流量和输沙量变化的主导因素。

研究表明, 在相似年降水条件下人类活动造成的延河时段 II 较时段 I 年径流量平均减少幅度 18.03%, 与冉大川等<sup>[11]</sup>的研究结果接近, 小于王飞等<sup>[4]</sup>的研究结果; 汛期径流量平均减少幅度 32.52%, 与朱恒峰等<sup>[5]</sup>的研究结果接近, 小于王飞等<sup>[4]</sup>的研究结果; 年输沙量平均减少幅度 47.08%, 大于冉大川等<sup>[11]</sup>的研究结果, 小于王飞等<sup>[4]</sup>的研究结果; 汛期输沙量平均减少幅度 47.52%, 与王飞等<sup>[4]</sup>的研究结果接近。

时段 III 较时段 I 年径流量平均减少幅度 29.77%, 与冉大川等<sup>[11]</sup>的研究结果接近, 大于王飞等<sup>[4]</sup>的研究结果; 汛期径流量平均减少幅度 46.29%, 大于王飞等<sup>[4]</sup>、朱恒峰等<sup>[5]</sup>的研究结果; 年和汛期输沙量平均减少幅度都达到 73.46%, 大于其它研究结果。

时段 IV 较时段 I 年径流量平均增加幅度 71.72%, 与冉大川等<sup>[15]</sup>、王飞等<sup>[4]</sup>的研究结果差异较大, 但变化趋势与李森等<sup>[16]</sup>对黄土高原沟壑区杨家沟小流域的研究结果相同; 汛期径流量平均增加幅度 97.79%, 与其它研究结果差异较大; 年输沙量平均增加幅度 162.07%, 与冉大川等<sup>[11]</sup>、王飞等<sup>[4]</sup>的研究结果差异较大, 但变化趋势与许炯心<sup>[17]</sup>研究结果相同; 汛期输沙量平均增加幅度 161.88%, 变化趋势与王飞等 1987—1996 年延河流域汛期<sup>[4]</sup>和许炯心黄河中游河龙区间<sup>[13]</sup>的研究结果相同。

#### 3.3 人类活动对延河径流量和输沙量变化影响的差异性

在相似年降水条件下人类活动对径流和泥沙影响比例不同, 尹国康统计分析结果表明, 同一时期人类活动对径流的影响幅度大于对输沙量的影响<sup>[18]</sup>; 冉大川等<sup>[11]</sup>、王飞等<sup>[4]</sup>研究认为, 同期人类活动对泥沙量的影响大于对径流量的影响。研究表明在相似

年降水条件下, 同期人类活动造成年和汛期输沙量的平均变化幅度分别为径流量的 3 倍和 2 倍。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] 朱显谟. 黄土高原水蚀的主要类型及其相关因素[ J ]. 水土保持通报, 1981, 1( 3 ): 1-9.
- [ 2 ] 穆兴民, 王飞, 李靖, 等. 水土保持措施对河川径流影响的评价方法研究进展[ J ]. 水土保持通报, 2004, 24( 3 ): 73-78.
- [ 3 ] 穆兴民, 王文龙. 水利水电工程对佳芦河流域暴雨洪水影响分析[ J ]. 水土保持通报, 2000, 20( 7 ): 24-27.
- [ 4 ] 王飞, 穆兴民, 焦菊英, 等. 基于含沙量分段的人类活动对延河水沙变化的影响分析[ J ]. 泥沙研究, 2007( 4 ): 8-13.
- [ 5 ] 朱恒峰, 赵文武, 康慕谊, 等. 水土保持地区人类活动对汛期径流影响的估算[ J ]. 水科学进展, 2008, 19( 3 ): 400-406.
- [ 6 ] 穆兴民. 黄土高原水土保持对河川径流及土壤水文的影响[ D ]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2002.
- [ 7 ] 王飞, 穆兴民, 李锐, 等. 相似性降水条件下北洛河水沙变化特征[ J ]. 水资源与水工程学报, 2008, 19( 6 ): 36-40.
- [ 8 ] 张攀, 姚文艺, 冉大川. 水土保持综合治理的水沙响应研究方法改进探讨[ J ]. 水土保持研究, 2008, 15( 2 ): 174-176.
- [ 9 ] 穆兴民, 李靖, 王飞, 等. 基于水土保持的流域降水—径流统计模型及其应用. 水利学报, 2004( 5 ): 122-128.
- [ 10 ] 段喜明, 吴普特, 陈晓兵, 等. 水土保持和气候波动对三川河水沙变化的影响[ J ]. 人民黄河, 2006, 28( 5 ): 53-55.
- [ 11 ] 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.
- [ 12 ] 许炯心. 人类活动对黄河河川径流的影响[ J ]. 水科学进展, 2007, 18( 5 ): 649-655.
- [ 13 ] 徐东霞, 章光新, 尹雄锐. 近 50 年嫩江流域径流变化及影响因素分析[ J ]. 水科学进展, 2009, 20( 3 ): 416-421.
- [ 14 ] 常丹东, 王礼先. 水土保持对黄河年径流量影响研究[ J ]. 水利规划与设计, 2005( 2 ): 37-61.
- [ 15 ] 冉大川, 柳林旺, 赵力仪, 等. 黄河中游河口镇至龙门区间水土保持与水沙变化[ M ]. 郑州: 黄河水利出版社, 2000.
- [ 16 ] 李森, 宋孝玉, 沈冰, 等. 人类活动对黄土沟壑区小流域水沙影响的研究[ J ]. 水土保持通报, 2005, 25( 5 ): 20-23.
- [ 17 ] 许炯心. 黄河中游多沙粗沙区水土保持减沙的近期趋势及其成因[ J ]. 泥沙研究, 2004( 2 ): 5-10.
- [ 18 ] 尹国康. 黄河中游粗沙多沙区水沙变化原因分析[ J ]. 地理学报, 1998, 53( 2 ): 174-182.
- [ 22 ] 汤国安, 杨昕. 地理信息系统空间分析实验教程[ M ]. 北京: 科学出版社, 2006: 363-422.
- [ 23 ] 刘凌, 崔广柏, 王建中. 太湖底泥氮污染分布规律及生态风险[ J ]. 水利学报, 2005, 36( 8 ): 900-905.
- [ 24 ] 王雨春, 万国江, 尹澄清, 等. 红枫湖、百花湖沉积物全氮、可交换性氮和固态铵的赋存特征[ J ]. 湖泊科学, 2002, 14( 4 ): 301-309.
- [ 25 ] 刘静静, 叶琳琳, 潘成荣, 等. 巢湖、瓦埠湖沉积物中氮赋存形态研究[ J ]. Agricultural Science & Technology, 2008, 9( 4 ): 155-156.
- [ 26 ] 杨路华, 沈荣开, 谭奇志. 土壤氮素矿化研究进展[ J ]. 土壤通报, 2003, 34( 6 ): 569-571.
- [ 27 ] 陈伏生, 曾德慧, 何兴元. 森林土壤氮素的转化与循环[ J ]. 生态学杂志, 2004, 23( 5 ): 126-133.
- [ 28 ] 元春英. 滇池现代沉积物的主要理化性质研究[ D ]. 昆明: 昆明理工大学, 2003.
- [ 29 ] 张燕, 邓西海, 彭补拙, 等. 基于<sup>137</sup>Cs 计年法估算滇池沉积物重金属负荷[ J ]. 地理科学, 2007, 27( 2 ): 261-267.
- [ 30 ] 桑丽娟. 滇池底泥沉积速率及重金属时间变异特征研究[ D ]. 南京: 南京师范大学, 2009.
- [ 31 ] Xing Kexia, Guo Haicheng, Sun Yangfeng et al. Assessment of the spatial-temporal eutrophic character in the Lake Dianchi [ J ]. Journal of Geographic Science, 2005, 15( 1 ): 37-43.

( 上接第 15 页 )