

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第5期 Vol.33 No.5 2013

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 (SHENTAI XUEBAO)

第33卷 第5期 2013年3月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 氮沉降对森林土壤有机质和凋落物分解的影响及其微生物学机制 王晶苑, 张心昱, 温学发, 等 (1337)
工业大麻对重金属污染土壤的治理研究进展 梁淑敏, 许艳萍, 陈 裕, 等 (1347)
最佳管理措施评估方法研究进展 孟凡德, 耿润哲, 欧 洋, 等 (1357)
灌木年轮学研究进展 芦晓明, 梁尔源 (1367)

个体与基础生态

- 华北落叶松夜间树干液流特征及生长季补水格局 王艳兵, 德永军, 熊 伟, 等 (1375)
土壤干旱胁迫对沙棘叶片光合作用和抗氧化酶活性的影响 裴 斌, 张光灿, 张淑勇, 等 (1386)
湖北石首麋鹿昼间活动时间分配 杨道德, 李竹云, 李鹏飞, 等 (1397)
三种杀虫剂亚致死浓度对川硬皮肿腿蜂繁殖和搜寻行为的影响 杨 桦, 杨 伟, 杨春平, 等 (1405)

种群、群落和生态系统

- 三沙湾浮游动物生态类群演替特征 徐佳奕, 徐兆礼 (1413)
滇西北高原纳帕海湿地湖滨带优势植物生物量及其凋落物分解 郭绪虎, 肖德荣, 田 昆, 等 (1425)
安徽新安江干流滩涂湿地草本植物区系及物种多样性 杨文斌, 刘 坤, 周守标 (1433)
湿地芦苇根结合好气细菌群落时空分布及其与水质因子的关系 熊 薇, 郭逍宇, 赵 霖 (1443)
三种温带树种叶片呼吸的时间动态及其影响因子 王兆国, 王传宽 (1456)
不同土壤水分条件下杨树人工林水分利用效率对环境因子的响应 周 洁, 张志强, 孙 阁, 等 (1465)
不同生态区域沙地建群种油蒿的钙组分特征 薛苹苹, 高玉葆, 何兴东 (1475)
藏北高寒草甸植物群落对土壤线虫群落功能结构的影响 薛会英, 胡 锋, 罗大庆 (1482)
铜尾矿废弃地土壤动物多样性特征 朱永恒, 沈 非, 余 健, 等 (1495)
环丙沙星对土壤微生物量碳和土壤微生物群落碳代谢多样性的影响 马 驿, 彭金菊, 王 芸, 等 (1506)
基于生态水位约束的下辽河平原地下水生态需水量估算 孙才志, 高 翳, 朱正如 (1513)

景观、区域和全球生态

- 佛山市高明区生态安全格局和建设用地扩展预案 苏泳娴, 张虹鸥, 陈修治, 等 (1524)
不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响 李建兴, 何丙辉, 谌 芸 (1535)
京沪穗三地近十年夜间热力景观格局演变对比研究 孟 舟, 王明玉, 李小娟, 等 (1545)
窟野河流域河川基流量变化趋势及其驱动因素 雷泳南, 张晓萍, 张建军, 等 (1559)
模拟氮沉降条件下木荷幼苗光合特性、生物量与 C、N、P 分配格局 李明月, 王 健, 王振兴, 等 (1569)
铁炉渣施加对稻田甲烷产生、氧化与排放的影响 王维奇, 李鹏飞, 曾从盛, 等 (1578)

资源与产业生态

- 食用黑粉菌侵染对茭白植株抗氧化系统和叶绿素荧光的影响 闫 宁, 王晓清, 王志丹, 等 (1584)

- 佛手低温胁迫相关基因的差异表达 陈文荣,叶杰君,李永强,等 (1594)
美洲棘薺马对不同蔬菜寄主的偏好性 朱亮,石宝才,官亚军,等 (1607)
茉莉酸对棉花单宁含量和抗虫相关酶活性的诱导效应 杨世勇,王蒙蒙,谢建春 (1615)
造纸废水灌溉对毛白杨苗木生长及养分状况的影响 王烨,席本野,崔向东,等 (1626)
基于数据包络分析的江苏省水资源利用效率 赵晨,王远,谷学明,等 (1636)

研究简报

- 太岳山不同郁闭度油松人工林降水分配特征 周彬,韩海荣,康峰峰,等 (1645)
基于 TM 卫星影像数据的北京市植被变化及其原因分析 贾宝全 (1654)
薇甘菊萎焉病毒感染对薇甘菊光合特性和 4 种酶活性的影响 王瑞龙,潘婉文,杨娇瑜,等 (1667)
第七届现代生态学讲座、第四届国际青年生态学者论坛通知 (I)
中、美生态学会联合招聘国际期刊主编 (i)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 338 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 34 * 2013-03



封面图说:美丽的油松松枝——油松又称红皮松、短叶松。树高可达 30m,胸径达 1m。其树皮下部灰褐色,裂成不规则鳞块;针叶 2 针一束,暗绿色,较粗硬;球果卵形或卵圆形,长 4—7cm,有短柄,与枝几乎成直角。油松适应性强,根系发达,树姿雄伟,枝叶繁茂,有良好的保持水土和美化环境的功能,是中国北方广大地区最主要的造林树种之一,在华北地区无论是山区或平原到处可见,人工林很多,一般情况下在山区生长最好。在山区生长的油松,多在阴坡、半阴坡,土壤湿润和较肥沃的地方。

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

DOI: 10.5846/stxb201205160732

雷泳南, 张晓萍, 张建军, 刘二佳. 窟野河流域河川基流量变化趋势及其驱动因素. 生态学报, 2013, 33(5): 1559-1568.

Lei Y N, Zhang X P, Zhang J J, Liu E J. Change trends and driving factors of base flow in Kuye River Catchment. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5): 1559-1568.

窟野河流域河川基流量变化趋势及其驱动因素

雷泳南^{1, 2}, 张晓萍^{1, 3, *}, 张建军^{1, 2}, 刘二佳^{1, 2}

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100;

2. 中国科学院研究生院, 100049, 北京; 3. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 杨凌 712100)

摘要: 河川基流量的变化是区域气候变化与人类活动的综合反映, 其对维持生态系统健康具有重要的意义。以黄土高原水蚀风蚀交错区典型流域窟野河流域为研究对象, 利用1959—2005年实测水文、气象资料, 基于Chapman-Maxwell数字滤波法的基流量计算, 分析窟野河流域河川基流量的变化趋势与演变特征, 从气候变化和人类活动两方面探讨了河川基流量变化的驱动因素。结果表明:(1)近50年来, 流域内7个时段(全年; 春季、夏季、秋季、冬季; 汛期、非汛期)的基流量均表现为极显著减少趋势, 全年基流量的减少量为0.628 mm/a, 并在1980和1996年发生两次明显的突变;(2)与基准期(1959—1979年)相比, 水土保持效应期(1980—1995年)的全年日基流量在5%, 50% 和95%的频率上相对减少率分别为30%, 38% 和54%, 煤炭开发期(1996—2005年)的全年日基流量在5%, 50% 和95%的频率上相对减少率分别为57%, 68% 和100%; (3)流域河川基流量减少是气候变化和人类活动共同作用的结果, 降水量的变化一定程度影响基流量, 但主要驱动因素是流域内大面积连片开采煤炭资源和过量开发利用地下水。

关键词: 窟野河; 基流; 趋势; 突变; 驱动因素

Change trends and driving factors of base flow in Kuye River Catchment

LEI Yongnan^{1, 2}, ZHANG Xiaoping^{1, 3, *}, ZHANG Jianjun^{1, 2}, LIU Erjia^{1, 2}

1 The State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry land Farming in Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

Abstract: The variation of base flow is a comprehensive reflection of the change of regional climate and human activities, and it is an important element to maintain sustainable development of the ecosystem. In this study, the Kuye River catchment, a tributary of the Yellow River, with a drainage area of 8706 km² on the Loess Plateau, was chosen to investigate the change trends and evolution characteristics of base flow. Based on Chapman-Maxwell base flow separation technique, the total runoff from Wenjiachuan hydrological station, which is the maximum control station in the Kuye River catchment, was separated into surface runoff and base flow. The nonparametric Mann-Kendall test and the Pettitt test were used to identify the trends and change points in the base flow during 1959 to 2005. The results indicated that: (1) In the past 50 years, a significant negative trend was detected in the annual base flow in all 7 time periods. For total year period, the average change rate is 0.628mm/a. The change points significantly occurred in 1980 and 1996. (2) Analysis of flow duration curves showed that, compared to the contrast period from 1959 to 1979, the relative changes of annual base flow for 5%, 50% and 95% exceeding time were lowered by 30%, 38% and 54%, respectively, in the treat period from 1980

基金项目:中国科学院知识创新项目(KZCX2-XB3-13); 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-04-03-03); 国家自然基金项目(41101265, 41230852)

收稿日期:2012-05-16; 修订日期:2012-11-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangxp@ms. iswc. ac. cn

to 1995, and the relative changes of annual base flow for 5%, 50% and 95% exceeding time were lowered by 57%, 68% and 100%, respectively in the coal mining period from 1996 to 2005. (3) The significant negative trend in base flow is a comprehensive effect of the change of regional climate and human activities, and the main factor is that excessive exploitation of a large area of coal resources and utilization of groundwater.

Key Words: Kuye River; base flow; trend; change point; influence factors

河川基流是指由地下水补给河川的水量。在非汛期时,基流是河川径流的主要组成部分。天然条件下,河川基流量稳定,具有维持河川径流、维护河流生态以及表生生态植被良性发展等多种功能,对维持生态系统健康起着重要的作用^[1]。近年来,在气候变化和人类活动的耦合作用下,黄河流域河川基流量大幅度减少,导致湖泊萎缩、湿地减少、草场退化及黄河断流等一系列生态环境问题的频繁出现,严重制约着流域经济发展和生态环境建设^[2-5]。分析黄河河川基流的演变过程,认识演变规律和影响因素,不仅有助于深入了解黄河流域水资源的特性,为合理开发利用水资源提供依据,同时也有利于水土保措施以及生态环境重建工程的合理布局。因此,河川基流已成为生态水文学研究的热点之一^[6-8]。

窟野河位于黄土高原水蚀风蚀交错区内,是黄河河口镇至龙门段右岸一条较大支流。流域地处干旱半干旱过渡带,降水稀少且暴雨集中,地形支离破碎,植被稀疏,自然灾害频繁,生态环境极其脆弱,水土流失异常严重^[9]。为遏制严重的水土流失,从建国初尤其是20世纪70年代开始,开展了大规模的水土流失综合治理和生态环境建设。同时,流域范围内蕴藏着丰富的煤炭资源,人类活动频繁^[10]。大面积水土保持措施的实施和煤炭的开采,极大地改变了流域下垫面条件,产生了巨大的水文效应。近年来,随着流域内经济的迅速发展,流域水资源供需矛盾日益突出,甚至出现了严重的断流现象,严重威胁到流域的生态环境与经济的可持续发展^[11]。

目前对窟野河流域的研究不少,但大多数主要集中在径流、泥沙以及水沙运行规律^[9-11],关于对维持生态系统健康具有极其重要意义的河川基流却鲜有文献报道。鉴于此,本文选取窟野河流域最大控制站温家川水文站实测日径流数据和流域气象资料,采用国内外常用的Chapman-Maxwell数字滤波法进行河川基流的计算,分析流域河川基流变化趋势与演变特征,从气候变化和人类活动两方面探讨了河川基流量变化的驱动因素,为流域水资源持续利用、生态环境建设提供科学依据。

1 研究区概况

窟野河流域位于陕西与内蒙古交界处鄂尔多斯台地毛乌素沙漠边缘(图1)。河流发源于内蒙古自治区东胜市巴定沟,流向东南,在神木县贺家川镇沙峁头村汇入黄河^[12]。干流全长242 km,流域面积8 706 km²。属于干旱或半干旱气候,多年平均降水量410 mm,年内降水的70%—80%集中在6—9月,且多暴雨。流域上游为风沙地貌,以固定、半固定沙丘为主,地势平坦,植被稀疏。流域中下游以盖沙丘陵和黄土丘陵沟壑地貌为主,沟壑纵横、梁峁起伏,沟深坡陡,地形破碎,水土流失严重,输沙模数12 261.4 t/km²。为了遏制严重的水土流失,流域从20世纪50年代开始开展大规模的水土流失综合治理,这些项目主要包括造林与种草等生物措施,梯田与坝地等工程措施,具体如表1所示。

表1 流域内各水土保持措施累积面积

Table 1 Accumulative area by the soil conservation measures in the study catchment

年份 Year	梯田 Terrace		造林 Afforestation		种草 Pasture		坝地 Check-dam	
	/km ²	SP/%	/km ²	SP/%	/km ²	SP/%	/km ²	SP/%
1959	5	9.26	27	50.00	22	40.74	0	0.00
1969	33	17.93	97	52.72	52	28.26	2	1.09
1979	66	11.02	415	69.28	110	18.36	8	1.34
1989	67	4.67	1004	69.92	353	24.58	12	0.83
1996	99	5.89	1184	70.39	380	22.59	19	1.13

SP:单一水土保持措施面积占当年全部水土保持措施面积的百分比

流域内的沙漠草原主要分布第四季风积、冲积、湖积粉细沙夹砂土、亚粘土孔隙潜水,含水层厚度一般为15—100m,水位埋深较浅,一般埋深10m左右,地下水主要以降水入渗补给为主,以向河水排泄为主^[4]。温家川水文站是流域最大控制站,其控制面积8 645 km²,多年平均径流深65.8 mm,多年平均基流深24.7 mm,占年总径流量的38% (图2)。

窟野河流域范围是我国重要的能源化工基地。流域于1978年开始开采煤炭,在20世纪80年代年均开采煤炭量约为 2.9×10^5 t,20世纪90年代上升到 5.2×10^6 t,21世纪前5a年均采煤量迅速增加到 5.4×10^7 t^[10]。煤炭产业的发展,使流域水资源供需矛盾日益突显,甚至出现枯水期断流现象^[11]。

2 数据及研究方法

2.1 数据获取及处理

温家川水文站1959—2005年实测日径流资料,来自于黄河中游水文站整编资料。采用Chapman-Maxwell滤波法^[15-16]对日径流量进行基流分割得到日基流量,由此按时间累计到年、月基流量。数据处理过程中,采用基流深(mm)概念,即将站点年(月)基流量除以控制面积,实际上反映了单位面积的基流量变化。流域气象资料来源于中国气象科学数据共享服务网,利用Kriging空间插值后进行面积加权平均得到流域面平均降水量^[13],使用流域面平均降水量来进行降水量分析;根据Penman-Monteith公式计算流域潜在蒸散发面平均值^[14],使用流域潜在蒸散发面平均值进行潜在蒸散发分析。流域内煤炭开采资料和水土保持措施面积资料分别来源于文献^[10,17],具体见图3。

2.2 数据分析方法

2.2.1 Chapman-Maxwell数字滤波法

数字滤波法是近年来国际上应用广泛的基流分割方法,它的原理是通过数字滤波器将信号分解为高频和低频,对应地将径流过程划分为地表径流和基流^[15]。

与传统手工作图法相比,数字滤波法具有客观性强、操作简单、计算速度快等特点,在实践中已得到了广泛应用。

研究中采用Chapman-Maxwell数字滤波法分割径流得到流域河川基流^[15-16]。该方法由Chapman和Maxwell于1996年提出,假定某时刻的基流为该时刻的地表径流和前一时刻基流的加权平均,即:

$$q_{b(i)} = k q_{b(i-1)} + (1 - k) q_{f(i)} \quad (1)$$

根据径流由地表径流和基流组成,即:

$$q_{(i)} = q_{f(i)} + q_{b(i)} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)消去地表径流得到基流分割方程,即:

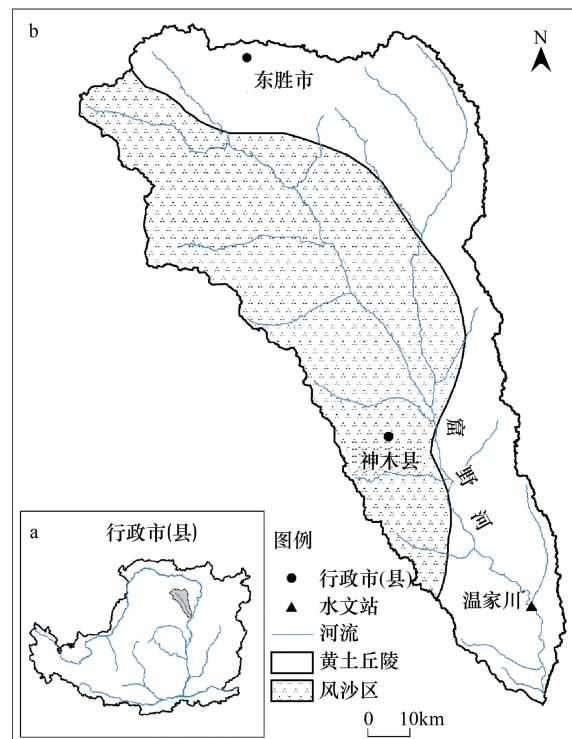


图1 窟野河流域概况图

Fig. 1 Location of the Kuye catchment

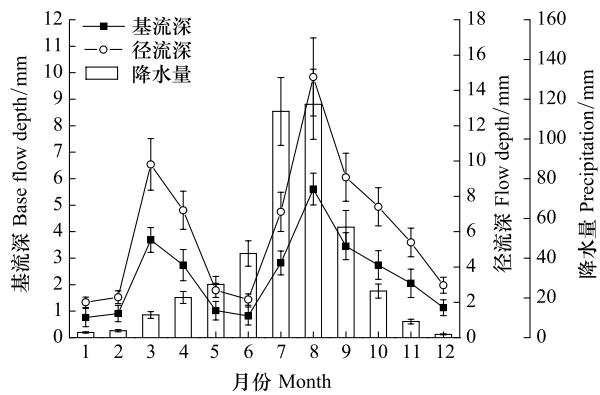


图2 流域月降水量与基流量的分配状况

Fig. 2 Distribution of monthly precipitation and base flow in the catchment

$$q_{b(i)} = \frac{k}{2-k} q_{b(i-1)} + \frac{1-k}{2-k} q_{(i)} \quad (3)$$

式中, $q_{(i)}$ 为第 i 时刻的径流量, m^3/s ; $q_{f(i)}$ 为第 i 时刻的地表径流量, m^3/s ; $q_{b(i)}$ 为第 i 时刻的基流量, m^3/s ; k 为退水系数, 一般情况下, k 取值为 0.95。

2.2.2 Mann-Kendall 检验法

Mann-Kendall 检验法是一种非参数检验方法, 其具有不受少数异常值干扰, 不受数据分布特征影响的特点, 近年来被广泛应用于气象和水文时间序列的变化趋势分析。文献^[18]对该方法进行了详细介绍。研究中利用 Mann-Kendall 检验法对流域年基流量和气象要素的变化趋势进行分析。

2.2.3 Pettitt 检验法

Pettitt 检验法是 1979 年提出的一种非参数检验方法, 与 Mann-Kendall 检验方法相结合进行水文、气象要素趋势分析及突变时间确定, 在国内外得到了广泛的应用^[19]。研究中利用 Pettitt 检验法对流域年基流量和气象要素的突变时间进行分析。

2.2.4 双累积曲线法

双累积曲线方法是目前分析水文气象要素一致性或长期变化趋势方法中最简单、最直观的方法^[20]。它的理论基础是在相同时间段内, 对于一个事件只要给的数据呈现正比关系, 那么两个变量各自的累积值可在直角坐标系上表示为一条直线, 其斜率为两变量对应的比例常数, 当直线的斜率发生突变时, 表明两个变量之间的比例常数发生了改变, 那么斜率发生突变点对应的年份就是这两个累积关系出现突变的时间。研究中利用年降水量与基流量的双累积曲线来分析流域基流量的突变点, 进一步验证 Pettitt 方法检验的突变点。

2.2.5 历时曲线法

流域的流量历时曲线(FDC)是一种频率累积曲线, 可以表示给定时段内大于或等于某一流量的流量持续时间, 能充分反映从丰水期、平水期到枯水期各流量状态下流域的径流特征^[21]。近年来, 流域历时曲线法被广泛应用于流域时段水文情势特征分析。研究中设流域基流历时曲线累积频率为 5%、50%、95% 分别代表丰水期、平水期和枯水期, 分析流域河川基流在不同时段相同频率上变化差异, 揭示流域人类活动引起的地表下垫面变化对流域河川基流的影响。

3 窟野河流域基流量变化分析

3.1 基流量年际变化趋势及跃变时间

流域全年、春、夏、秋、冬及汛期和非汛期 7 个时段基流量均表现出 0.001 水平的极显著减少趋势, 如表 2 所示。全年趋势变化斜率达 -0.628 mm/a , 四季中夏季基流量下降趋势最大, 为 -0.212 mm/a , 其次为秋季、春季和冬季, 分别为 -0.196 、 -0.162 、 -0.050 mm/a 。汛期内流域河川基流量减少程度是非汛期的 1.6 倍, 达到 -0.367 mm/a 。

从表 2 可以看出, 流域 7 个时段基流量在统计上均具有跃变性质, 跃变时间出现在 1979 年到 1988 年间, 除夏季出现 0.01 的显著水平外, 其余各时段均达到了 0.001 的极显著性。图 4 是利用 Pettitt 检验法对流域全年基流量的突变时间进行判断, 结果表明突变时间发生在 1980 年, 这与张晓萍等^[13]在该区对径流突变时间研究结论基本一致。

为了进一步验证流域全年基流量的突变时间, 研究中同时利用年降水量和年基流量的双累积曲线进行突变检验, 如图 5 所示。从图 5 可以看出, 流域全年基流量在 1980 年和 1996 年发生两次突变, 前者与流域在 20 世纪七八十年代大规模开展水土流失治理, 尤其是大量修建水利水保工程有关; 后者与流域内煤矿开采量大幅度增

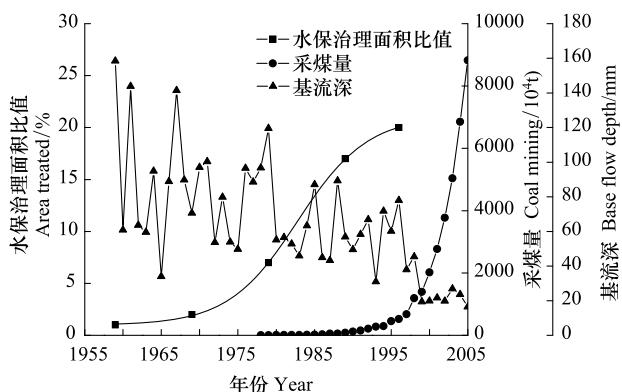


图 3 流域年基流量、水土保持治理面积和采煤量

Fig. 3 Annual base flow, the area of treated by soil conservation measures and coal mining in the catchment

加,破坏含水层,漏失地下水资源,造成地下水对基流的补给量减少,进而导致河川基流量的大量衰减。

表 2 流域基流 Mann-Kendall 趋势检验结果

Table 2 Results of trend tests for baseflow variables by Mann-Kendall in catchment

时间序列 Time-series	年基流量 Annual base flow			突变点 Change point	
	Test Z	显著性 Significance	变化率 Slope (β)/(mm/a)	年份 Year	显著性 Significance
全年 Total year	-5.78	***	-0.628	1980	***
春季 Spring	-6.22	***	-0.162	1981	***
夏季 Summer	-3.74	***	-0.212	1988	**
秋季 Autumn	-4.95	***	-0.196	1985	***
冬季 Winter	-5.26	***	-0.050	1980	***
汛期 Wet season	-4.66	***	-0.367	1979	***
非汛期 Dry season	-5.94	***	-0.233	1981	***

* * * $P<0.001$; ** $P<0.01$

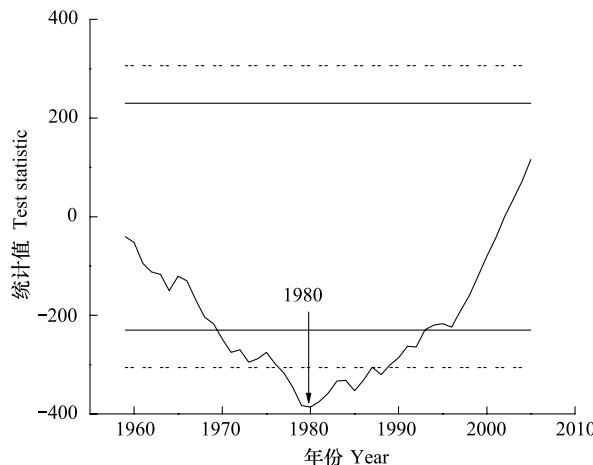


图 4 流域年基流量突变点检验

Fig. 4 Pettitt's test for detecting a change point in annual base flow of total year period

3.2 基流变化程度

基于上述 Pettitt 检验和双累积曲线检验的基流突变时间为界,将研究中的水文序列划为 3 个阶段,即基准期(1959—1979 年)、水土保持效应期(1980—1995 年)和煤炭开发期(1996—2005 年)。与基准期相比,流域日基流量在水土保持效应期和煤炭开发期内 7 时段丰水(5%)、平水(50%)和枯水(95%)时的变化量,如图 6 和表 3 所示。

从图 6 中可以看出,与基准期相比,水土保持效应期日基流量在 5% 频率减少 30%,20%—80% 频率普遍减少 35%—40%,95% 频率减少 54%;煤炭开发期日基流量在 5% 频率减少 57%,20%—80% 频率普遍减少 65%—70%,95% 频率减少 100%。相比基准期,水土保持效应期和煤炭开发期日基流量平均相对减少分别为 36.3% 和 66.1%。

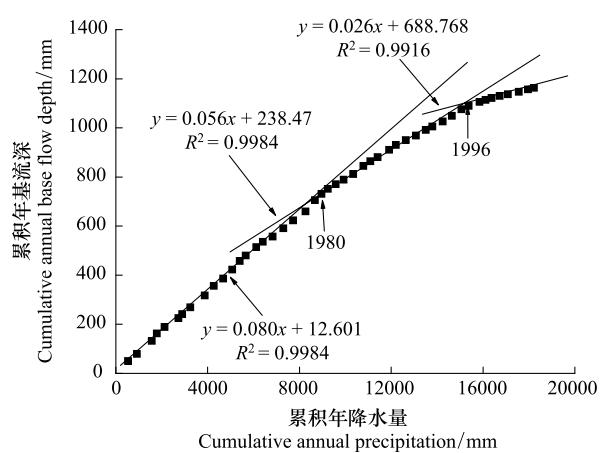


图 5 流域年基流深和降水量的双累积曲线

Fig. 5 The double mass curve of cumulative annual precipitation and annual base flow depth in catchment

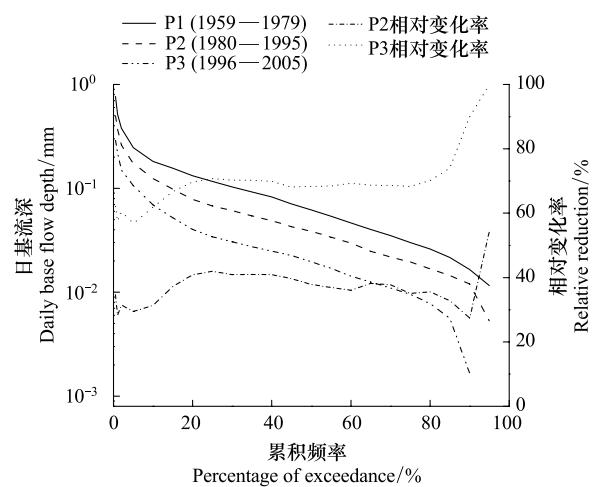


图 6 流域 3 个时期日基流历时曲线和相对变化率

Fig. 6 Daily base flow curves in stage 1 from 1959 to 1979, stage 2 from 1980 to 1995 and stage 3 from 1996 to 2005 for total year period and the relative changes compared to stage 1 in catchment

表3 流域7个时段日基流量在丰、平、枯水时期的相对变化率

Table 3 The relative changes represented by daily base flow curves in high, midean and low flows in 7 time series in study catchment

相对变化 Relative changes	全年 Total year		春季 Spring		夏季 Summer		秋季 Autumn	
	s2	s3	s2	s3	s2	s3	s2	s3
$\Delta Qb_5/\%$	-29.5	-56.8	-20.7	-43.9	-19.1	-54.0	-29.8	-60.8
$\Delta Qb_{50}/\%$	-37.9	-68.3	-40.7	-61.9	-38.7	-78.0	-40.9	-67.9
$\Delta Qb_{95}/\%$	-54.4	-100	-65.6	-95.6	-100	-100	-42.5	-79.3

相对变化 Relative changes	冬季 Winter		汛期 Wet season		非汛期 Dry season		s2	s3
	s2	s3	s2	s3	s2	s3		
$\Delta Qb_5/\%$	-32.7	-58.1	-25.4	-65.2	-24.1	-44.1		
$\Delta Qb_{50}/\%$	-32.2	-58.0	-39.7	-73.5	-34.2	-63.1		
$\Delta Qb_{95}/\%$	-11.2	-48.0	-67.6	-100	-15.8	-55.8		

s2: 水土保持效应期 Treat period; s3: 煤炭开发期 Coal mining period

其余6个时段的相对减少量差异很大,总体上看,煤炭开发期的日基流量减少量是后期的2倍(表3)。与基准期相比,水土保持效应期日基流量在5%频率减少20%—30%,50%频率减少30%—40%,95%频率减少15%—100%;煤炭开发期日基流量在5%频率减少50%—65%,50%频率减少60%—75%,95%频率减少50%—100%。

为了进一步分析流域日基流量的变化特性,统计了基准期、水土保持效应期和煤炭开发期3个时期流域7个时段基流量的丰水指数(Qb_5/Qb_{50})和枯水指数(Qb_{95}/Qb_{50}),如表4所示。从表4可以看出,流域7个时段基流量从基准期到水土保持效应期再到煤炭开发期总体呈现丰水指数增大,枯水指数减小的变化特征,表明流域内常水径流及枯水径流减少的比重较大。

表4 流域7个时段的丰水指数和枯水指数

Table 4 The high-flow indices and low-flow indices in 7 time stages in catchment

指数 Indices	全年 Total year			春季 Spring			夏季 Summer			秋季 Autumn		
	s1	s2	s3	s1	s2	s3	s1	s2	s3	s1	s2	s3
$\Delta Qb_{50}/\text{mm}$	0.06	0.04	0.02	0.09	0.05	0.03	0.04	0.03	0.01	0.09	0.05	0.03
$\Delta Qb_5/Qb_{50}$	4.0	4.5	5.4	2.3	3.1	3.4	8.8	11.6	18.5	2.6	3.2	3.2
$\Delta Qb_{95}/Qb_{50}$	0.19	0.14	0	0.21	0.12	0.02	0.08	0	0	0.4	0.4	0.3

指数 Indices	冬季 Winter			汛期 Wet season			非汛期 Dry season			s1	s2	s3
	s1	s2	s3	s1	s2	s3	s1	s2	s3			
$\Delta Qb_{50}/\text{mm}$	0.03	0.02	0.01	0.07	0.04	0.02	0.06	0.04	0.02			
$\Delta Qb_5/Qb_{50}$	2.3	2.3	2.3	5.1	6.3	6.7	3.2	3.8	5.0			
$\Delta Qb_{95}/Qb_{50}$	0.5	0.6	0.6	0.1	0.1	0	0.3	0.4	0.4			

s1: 基准期 Contrast period; s2: 水土保持效应期 Treat period; s3: 煤炭开发期 Coal mining period

4 窟野河流域基流演变驱动因素分析

自然条件和人为因素都会引起流域水文发生效应变化,成为分析流域河川基流演变的两大重要原因。从短时间尺度来看,流域地质地貌、土壤性质及地面组成物质等自然条件几乎不会有变化,但流域河川基流量却呈现极显著减少趋势,显然,这种趋势变化与流域气候变化和人类活动有着重要的关系。本文中气候变化主要分析流域降水量和潜在蒸散发两个因素。

4.1 气候变化

降水是地表径流的本源,也是地下水的主要补给源。自然状况下,流域基流数量及时间分布与降水存在

着良好的对应关系^[22]。尤其是在干旱半干旱地区,降水的微弱变化都会反映到径流情势中。流域内3个时期年降水量与年基流量的统计值,如表5所示。

表5 流域3个时期年降水量与基流量的统计值

Table 5 The statistic of annual precipitation and base flow in the three periods in catchments

时期 Periods	降水 Precipitation			基流 Base flow		
	数量 Amount /mm	ΔQ_1 /mm	ΔV_1 /%	数量 Amount /mm	ΔQ_1 /mm	ΔV_1 /%
基准期 Contrast period	413.10	—	—	33.61	—	—
水土保持效应期 Treat period	373.03	-40.07	-9.70	21.43	-12.18	-36.23
煤炭开发期 Coal mining period	358.31	-54.79	-13.26	11.43	-22.18	-66.00

ΔQ_1 :降水变化量 Change amount of precipitation; ΔV_1 :降水变化率 change rate of precipitation; ΔQ_2 :基流变化量 Change amount of base flow; ΔV_2 :基流量变化率 change rate of base flow

从表5可以看出,窟野河流域基流量与降水量的变化具有同步性。3个时期(基准期、水土保持效应期和煤炭开发期)基流量的多年平均降雨量分别为413.10 mm、373.03 mm和358.31 mm,多年平均基流量分别为33.61 mm、21.43 mm和11.43 mm,与基准期相比,水土保持期和煤炭开发期的降水量分别减少40.07 mm和54.79 mm,相对减少率分别为9.70%和13.26%,基流量分别减少12.18 mm和22.18 mm,相对减少率分别为36.23%和66.00%,一定程度上反映了流域基流量随着降水量的减少而减少。

表6 流域降水量和潜在蒸散发变化趋势及突变时间检验

Table 6 Analysis of precipitation and PE using the Mann-Kendall and Pettitt test

因子 Factors	Mann-Kendall 检验			Pettitt 检验	
	Test Z	显著性 Significance	变化率 Slope (β) /(mm/a)	年份 Year	显著性 Significance
降水量 Precipitation	-0.72	Ns	-1.04	—	—
潜在蒸散发量 Potential Evapotranspiration	-4.26	* * *	-3.80	1981	* * *

* * * $P < 0.001$; * * $P < 0.01$; Ns: $P > 0.5$; —: 未涉及

同时利用Mann-Kendall检验和Pettitt检验对流域年降水量及潜在蒸散发的变化趋势和突变点进行检验,结果如表6。从表6可以看出,流域降水量呈现微弱的减少趋势,但并未达到显著性,降水序列中不存在突变点。

潜在蒸散发虽然不能代表流域内的实际蒸散发,但在一定程度上反映了流域内气象要素的变化,对流域水循环有着重要的影响^[14]。窟野河流域内的潜在蒸散发呈现极显著的减少趋势,并在1981年发生突变(表6)。可见,流域潜在蒸散发对河川基流量减少的影响不大。

4.2 人为因素

地下水作为河川基流的主要补给源,其时空分布状况对基流的补给和消耗过程有着深刻的影响。窟野河流域地处干旱缺水地区,长期以来,地下水是维持流域人类生产生活的主要水源之一^[1]。随着流域工农业的发展,集中连片开采地下水及沿河灌溉取水等人类活动日益频繁。这些人类活动,改变局部地下水的时空分布和水循环过程,对河川基流量的演变起到了巨大的影响。

4.2.1 煤矿等资源开采对基流的影响

煤矿开采是造成窟野河流域河川基流量大量衰减的最主要因素^[10,23-24]。相关部门探测查明,在内蒙古南部与陕西北部接壤地带,蕴藏着丰富的优质煤炭资源,其中90%近期重点开采的矿区面积位于窟野河流域^[23]。从1978年开始开采煤炭尤其是20世纪90年后期以来,煤炭资源开采量大幅度增加。由于流域风沙地区内的河流40%—70%流量来源于地下水补给,且含水层埋藏浅,位于煤层之上,大量煤炭连片开采,破坏地下含水层,漏失地下水,导致补给河川基流的地下水不断减少^[1]。

大柳塔煤矿是流域内一座特大型现代化矿井,煤炭开采前,地下水原始流场为以母河沟泉为中心的自流盆地,随着开采面积和强度的加大,地下水位迅速下降,幅度达10—12 m,最终稳定在基岩界面附近,同时矿区地下水位等高线向采空区一侧倾斜,并形成了以采空区为中心的降落漏斗^[23]。双沟支流是窟野河上游乌兰木伦河的一条支流,多年平均流量7 344 m³/d,煤炭开采后,该支流出现断流,泉眼干枯^[23-24]。据神木县水利局资料,2000年窟野河断流75 d,2001年创历史断流最长记录,达106 d。近年来,随着流域上游煤炭开采量大幅度增加,窟野河断流现象日趋严重。

4.2.2 地下水过量开采及不合理的开发利用

流域河川基流量减少的另一个原因是流域内地下水开采量和非汛期灌溉引水量的增加。地下水开采与河川基流都是流域内地下水排泄方式的表现,在总量一定的条件,地下水开采增大,地下水侧向排泄量相应减少,进而削减河川基流量^[1]。在流域内的沙漠草原区一带,井灌面积不断扩大,地下水开采量大量增加,部分地区地下水位下降1—2 m,造成补给该地区河川基流的地下水量减少^[4]。另一方面,随着流域内经济快速发展,高耗水工业也随之增多,用水量大幅度增加,地下水开采和傍河取水等活动频繁发生。据统计资料表明^[24-25],该区工业的水资源利用水平极低,万元产值耗水达964 m³,远低于我国平均水平,水的重复利用率几乎为零;农业灌渠水资源的有效利用率只有20%左右。可见,流域内地下水资源过量开采及不合理利用导致补给河川径流的地下水不断减少,最终削减了河川基流量。

4.2.3 水利工程对基流的影响

窟野河流域内的水利工程主要包括水库、塘坝、沟渠等,这些水利工程的修建和使用,改变了流域下垫面状况,影响流域水量平衡,进而导致河川基流量在时空分配上的变化。据神木县志记载,到20世纪80年代末,该县已建成灌溉渠道总长约168 km,抽水站500多处,总灌溉面积146 km²;水库57座,池塘148个,总容量近5500万m³;人畜饮水工程66处,解决大量的人、畜饮水问题。窟野河流域在50年代开始修建坝库,至1988年现存坝库844座,其中有662座修建于70年代^[12]。大规模的水利工程措施改变了流域下垫面水循环状况,20世纪70年代末和80年代初期凸显了其水文效应^[26]。流域内的水利工程建设对河川基流量的衰减有着一定程度的影响。

4.2.4 水土保持对基流的影响

从建国之初尤其是20世纪70—80年代,黄土高原开展了大规模的生态环境建设和水土流失综合治理。这些水土保持措施的实施,拦截部分降水入渗补给地下水,增加河川基流量。但基流量的大小主要取决于流域降水量的大小,水土保持措施对基流的影响主要表现在流域基流量占总径流量比例(即基流指数)的变化^[22]。由图7可知,随着流域水土保持面积占流域面积比值的增加,基流指数呈现增大趋势。为了更直观地解释这个问题,图8给出了流域年基流指数与年径流量过程线,从图中可以看出,流域年径流量呈极显著减少趋势,但年基流指数基本保持稳定,甚至在1996年后基流指数呈现增加趋势。1980年后年基流指数与年径流量在图上基本表现为对称性分布关系,即年径流量越小,年基流指数越大。这反映了水土保持措施对不同强度降水量的拦截作用,降水量强度较小时拦水作用明显,地表产流少,利于下渗,相应的基流指数较大;反之,基流指数较低^[22]。

综合以上分析,窟野河流域河川基流量减少是气候变化和人类活动共同影响的结果。其中降水量的变化

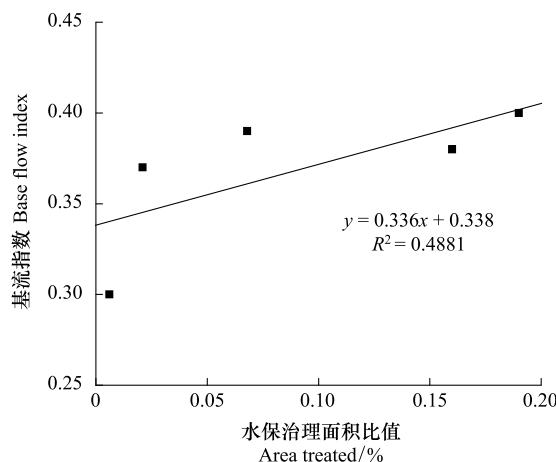


图7 流域水保面积比值与基流指数关系图
Fig. 7 The Ratio of Soil Conservation Measures Area and Base flow Index

一定程度上影响了流域河川基流量。对流域内的人类活动各因素的分析可以看出,流域内大面积连片开采煤炭资源是流域河川基流量减少最主要的因素,其次是过量开发利用地下水,水利工程建设的作用也是不可忽视。虽然流域内开展的水土保持综合治理,改变了流域下垫面状况,增加了部分降水的入渗,对河川基流增加起到了正效应,但在降水量变化和煤炭开采、地下水开发及水利工程等人类活动的综合效应下,流域河川基流量还是呈现显著下降趋势。

5 结论

(1) 近 50 年来,流域内 7 个时段(全年;春季、夏季、秋季、冬季;汛期和非汛期)的基流量均表现为极显著减少趋势。全年基流量的减少量为 0.628 mm/a ;四季中夏季减少量最大为 0.212 mm/a ,冬季最小为 0.050 mm/a ;汛期基流量减少程度是非汛期的 1.6 倍,达到 -0.367 mm/a 。流域内全年基流量在 1980 和 1996 年发生两次明显的突变。

(2) 历时曲线分析表明,与基准期(1959—1979 年)相比,水土保持效应期(1980—1995 年)的全年日基流量在 5%, 50% 和 95% 的频率上相对减少率分别为 30%, 38% 和 54%, 煤炭开发期(1996—2005 年)的日基流量在 5%, 50% 和 95% 的频率上相对减少率分别为 57%, 68% 和 100%。其余 6 个时段(春季、夏季、秋季、冬季;汛期和非汛期)的相对减少量差异很大,与基准期(1959—1979 年)相比,水土保持效应期(1980—1995 年)各时段日基流量在 5%, 50% 和 95% 的频率上相对减少率分别为 20%—30%, 30%—40% 和 15%—100%, 煤炭开发期(1996—2005 年)各时段日基流量在 5%, 50% 和 95% 的频率上相对减少率分别为 50%—65%, 60%—75% 和 50%—100%。

(3) 近 50 年来,窟野河流域河川基流量减少是气候变化和人类活动共同作用的结果,但主要驱动因素是流域内大面积连片开采煤炭资源和过量开发利用地下水。在流域降水量不显著减少和潜在蒸散发极显著减少的背景下,如何定量区分各因素对流域河川基流量变化的影响,有待深入分析。

致谢: 黄河水利委员会黄河水利科学研究院蒋晓辉博士对资料收集提供帮助,特此致谢。

References:

- [1] Wang Y L, Wang W K, Qian Y P, Duan L, Yang Z Y. Change characteristics and driving forces of base flow of yellow river basin. Journal of Natural Resources, 2008, 23(3): 479-486.
- [2] Liu C M, Cheng L. Analysis on runoff series with special reference to drying up courses of lower Huanghe river. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(3): 257-265.
- [3] Liu C M, Zhang X C. Causal analysis on actual water flow reduction in the mainstream of the yellow river. Acta Geographica Sinica. 2004, 59(3): 323-330.
- [4] Qian Y P, Jiang X H, Jin S Y, Zhang P D. Analysis on the characteristic and variation of bade flow in loess plateau of the middle reaches of Huanghe river. Journal of Earth Sciences and Environment, 2004, 26(2): 88-91.
- [5] Liang S H, Xu D W, Wan L, Chen J, Zhang J F. Periodic regularity of the headwater region of the yellow river affecting factors. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing; Peking University, 2008, 15(4): 280-289.
- [6] Zuo H F, Wu S L, Shao J L, Cui Y L. Application of computerized base-flow separation method with BFI program in mountainous areas. Journal of China Hydrology, 2007, 27(1): 69-71.
- [7] Lin Q C, Li H E. Influence and guarantee on ecological basic flow of Weihe river from Baojixia water diversion. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(11): 114-119.
- [8] Dou L, Huang M B. Applied study of baseflow separation methods in watersheds of loess plateau. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(3): 107-111.
- [9] Fan N N, Xue X N. Analysis on sediment movement characters in the Kuye River. Journal of Sediment Research, 2010, 35(2): 75-80.

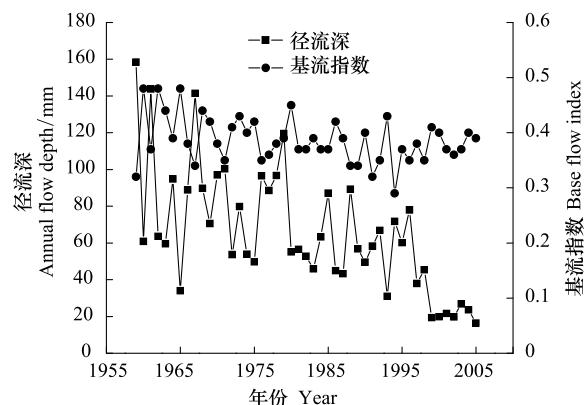


图 8 窟野河流域标准化年基流量与年基流指数过程线

Fig. 8 The Standardized Annual Base flow and Base flow Index Process Line in Study Catchments

- [10] Jiang X H, Gu X W, He H M. The influence of coal mining on water resources in the river basin. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(2): 300-307.
- [11] Wang X J, Cai H J, Zhang X, Wang J, Liu H Y. Analysis on the seasonal drying-up causes of Kuye river, *Resources Science*, 2008, 30(3): 475-480.
- [12] Jiao E Z. Analysis on the trend of streamflow and sediment in Kuye river // Wang G, Fan Z. Study on the change of streamflow and sediment in yellow river (volume 1, book 2). Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press. 2002: 538-550.
- [13] Zhang X P, Zhang L, Wang Y, Mu X M. Tempo-spatial responses of the annual streamflow to LUCC in the middle reaches of yellow river, China. *Science of Soil and Water Conservation*, 2009, 7(1): 19-26.
- [14] Liu C M, Zhang D. Temporal and spatial change analysis of the sensitivity of potential evapotranspiration to meteorological influencing factors in China. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(5): 579-588.
- [15] Chapman T G, Maxwell A I. Baseflow separation-comparison of numerical methods with tracer experiments. Institute Engineers Australia National Conference. Camberra: Institute of Engineers Australia, 1996, 05: 539-545
- [16] Lei Y N, Zhang X P, Zhang J J, Liu E J, Zhang Q Y, Chen N. Suitability analysis of automatic base flow separation methods in typical watersheds of water-wind erosion crisscross region on the Loess Plateau, China. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(6): 57-64.
- [17] Ran D C, Liu L W, Zhao L Y. The change of soil and water conservation, streamflow and sediment in Hekou-Longmen region in middle reaches of yellow river. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press. 2000: 62-83.
- [18] Gan T. Hydroclimatic trends and possible climatic warming in the Canadian prairies. *Water Resources Research*, 1998, 34(11): 3009-3015.
- [19] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, 1979, 28(2): 126-135.
- [20] Mu X M, Zhang X Q, Gao P, Wang F. Theory of double mass curves and its applications in hydrology and meteorology. *Journal of China Hydrology*, 2010, 30(4): 47-51.
- [21] Vogel R M, Fennessey N. Flow-duration curves. I: New interpretation and confidence intervals. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1994, 120(4): 485-490.
- [22] Lin X Y, Wang J S. Study on groundwater resources of the yellow river basin and its update ability. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press. 2006: 43-49.
- [23] Wang S M, Fan L M. Discussion on continuable development of Jurassic coalfields in northern Shaanxi // Wang S M. Coal geology and sustainable development research. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2002: 1-7.
- [24] Fan L M. Consideration and countermeasure on water interception of Kuye river 1st level branch in middle reaches of yellow river. *Ground water*, 2004, 26(4): 236-237, 241.
- [25] Huo Y G. Policy solution of China water problems. Xi'an: Shaanxi People Press, 2000: 275-276.
- [26] Jing K, Zheng F L. Effects of soil and water conservation on surface water resource on the Loess Plateau. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(4): 11-12, 73.

参考文献:

- [1] 王雁林,王文科,钱云平,段磊,杨泽元. 黄河河川基流量演化规律及其驱动因子探讨. *自然资源学报*, 2008, 23(3): 479-486.
- [2] 刘昌明,成立. 黄河干流下游断流的径流序列分析. *地理学报*, 2000, 55(3): 257-265.
- [3] 刘昌明,张学成. 黄河干流实际来水量不断减少的成因分析. *地理学报*, 2004, 59(3): 323-330.
- [4] 钱云平,蒋秀华,金双彦,张培德. 黄河中游黄土高原区河川基流特点及变化分析. *地球科学与环境学报*, 2004, 26(2): 88-91.
- [5] 梁四海,徐德伟,万力,陈江,张建锋. 黄河源区基流量的变化规律及影响因素. *地学前缘*, 2008, 15(4): 280-289.
- [6] 左海凤,武淑林,邵景力,崔亚莉. 山丘区河川基流 BFI 程序分割方法的运用与分析——以汾河流域河岔水文站为例. *水文*, 2007, 27(1): 69-71.
- [7] 林启才,李怀恩. 宝鸡峡引水对渭河生态基流的影响及其保障研究. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(11): 114-119.
- [8] 豆林,黄明斌. 自动基流分割方法在黄土区流域的应用研究. *水土保持通报*, 2010, 30(3): 107-111.
- [9] 范念念,薛小妮. 窟野河泥沙输移与冲淤特征分析. *泥沙研究*, 2010, 35(2): 75-80.
- [10] 蒋晓辉,谷晓伟,何宏谋. 窟野河流域煤炭开采对水循环的影响研究. *自然资源学报*, 2010, 25(2): 300-307.
- [11] 王小军,蔡焕杰,张鑫,王健,刘红英,翟俊峰. 窟野河季节性断流及其成因分析. *资源科学*, 2008, 30(3): 475-480.
- [12] 焦恩泽. 窟野河水沙变化趋势初步分析 // 汪岗,范昭. 黄河水沙变化研究第1卷(下册). 郑州:黄河水利出版社. 2002: 538-550.
- [13] 张晓萍,张橹,王勇,穆兴民. 黄河中游地区年径流对土地利用变化时空响应分析. *中国水土保持科学*, 2009, 7(1): 19-26.
- [14] 刘昌明,张丹. 中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分析. *地理学报*, 2011, 66(5): 579-588.
- [16] 雷泳南,张晓萍,张建军,刘二佳,张庆印,陈妮. 自动基流分割法在黄土高原水蚀风蚀交错区典型流域适用性分析. *中国水土保持科学*, 2011, 9(6): 57-64.
- [17] 冉大川,柳林旺,赵力仪. 黄河中游河口至龙门区间水土保持与水沙变化. 郑州:黄河水利出版社. 2000: 62-83.
- [20] 穆兴民,张秀勤,高鹏,王飞. 双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题. *水文*, 2010, 30(4): 47-51.
- [22] 林学钰,王金生. 黄河流域地下水资源及其可更新能力研究. 郑州:黄河水利出版社. 2006: 43-49.
- [23] 王双明,范立民. 论陕北侏罗纪煤田开发的可持续发展问题 // 王双明. 煤田地质与可持续发展研究. 西安:陕西科学技术出版社. 2002: 1-7.
- [24] 范立民. 黄河中游一级支流窟野河断流的反思与对策. *地下水*, 2004, 26(4): 236-237, 241.
- [25] 霍有光. 策解中国水问题. 西安:陕西人民出版社, 2000, 275-276.
- [26] 景可,郑粉莉. 黄土高原水土保持对地表水资源的影响. *水土保持研究*, 2004, 11(4): 11-12, 73.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33 ,No. 5 March ,2013(Semimonthly)
CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- The effect of nitrogen deposition on forest soil organic matter and litter decomposition and the microbial mechanism WANG Jingyuan, ZHANG Xinyu, WEN Xuefa, et al (1337)
Advances and the effects of industrial hemp for the cleanup of heavy metal pollution LIANG Shumin, XU Yanping, CHEN Yu, et al (1347)
A review for evaluating the effectiveness of BMPs to mitigate non-point source pollution from agriculture MENG Fande, GENG Runzhe, OU Yang, et al (1357)
Progresses in dendrochronology of shrubs LU Xiaoming, LIANG Eryuan (1367)

Autecology & Fundamentals

- The characteristics of nocturnal sap flow and stem water recharge pattern in growing season for a *Larix principis-rupprechtii* plantation WANG Yanbing, DE Yongjun, XIONG Wei, et al (1375)
Effects of soil drought stress on photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities in *Hippophae rhamnoides* Linn. seedlings PEI Bin, ZHANG Guangcan, ZHANG Shuyong, et al (1386)
Diurnal activity time budget of Père David's deer in Hubei Shishou Milu National Nature Reserve, China YANG Daode, LI Zhuyun, LI Pengfei, et al (1397)
Sublethal effects of three insecticides on the reproduction and host searching behaviors of *Sclerodermus sichuanensis* Xiao (Hymenoptera: Bethyidae) YANG Hua, YANG Wei, YANG Chunping, et al (1405)

Population, Community and Ecosystem

- Seasonal succession of zooplankton in Sansha Bay, Fujian XU Jiayi, XU Zhaoli (1413)
Biomass production and litter decomposition of lakeshore plants in Napahai wetland, Northwestern Yunnan Plateau, China GUO Xuhu, XIAO Derong, TIAN Kun, et al (1425)
The flora and species diversity of herbaceous seed plants in wetlands along the Xin'anjiang River from Anhui YANG Wenbin, LIU Kun, ZHOU Shoubiao (1433)
Spatial-temporal variation of root-associated aerobic bacterial communities of *phragmites australis* and the linkage of water quality factors in constructed wetland XIONG Wei, GUO Xiaoyu, ZHAO Fei (1443)
Temporal dynamics and influencing factors of leaf respiration for three temperate tree species WANG Zhaoguo, WANG Chuankuan (1456)
Environmental controls on water use efficiency of a poplar plantation under different soil water conditions ZHOU Jie, ZHANG Zhiqiang, SUN Ge, et al (1465)
An analysis of calcium components of *Artemisia ordosica* plant on sandy lands in different ecological regions XUE Pingping, GAO Yubao, HE Xingdong (1475)
Effects of alpine meadow plant communities on soil nematode functional structure in Northern Tibet, China XUE Huiying, HU Feng, LUO Daqing (1482)
Soil fauna diversity of abandoned land in a copper mine tailing area ZHU Yongheng, SHEN Fei, YU Jian, et al (1495)
Effects of ciprofloxacin on microbial biomass carbon and carbon metabolism diversity of soil microbial communities MA Yi, PENG Jinju, WANG Yun, et al (1506)
Estimation of ecological water demands based on ecological water table limitations in the lower reaches of the Liaohe River Plain, China SUN Caizhi, GAO Ying, ZHU Zhengru (1513)

Landscape, Regional and Global Ecology

- The ecological security patterns and construction land expansion simulation in Gaoming SU Yongxian, ZHANG Hong'ou, CHEN Xiuzhi, et al (1524)
Root features of typical herb plants for hillslope protection and their effects on soil infiltration LI Jianxing, HE Binghui, CHEN Yun (1535)

- The dynamic change of the thermal environment landscape patterns in Beijing, Shanghai and Guangzhou in the recent past decade ...
..... MENG Dan, WANG Mingyu, LI Xiaojuan, et al (1545)
- Change trends and driving factors of base flow in Kuye River Catchment
..... LEI Yongnan, ZHANG Xiaoping, ZHANG Jianjun, et al (1559)
- Photosynthetic characteristics, biomass allocation, C, N and P distribution of *Schima superba* seedlings in response to simulated
nitrogen deposition LI Mingyue, WANG Jian, WANG Zhenxing, et al (1569)
- Effect of iron slag adding on methane production, oxidation and emission in paddy fields
..... WANG Weiqi, LI Pengfei, ZENG Congsheng, et al (1578)
- Resource and Industrial Ecology**
- Antioxidative system and chlorophyll fluorescence of *Zizania latifolia* Turcz. plants are affected by *Ustilago esculenta* infection
..... YAN Ning, WANG Xiaoqing, WANG Zhidan, et al (1584)
- Analysis of cold-regulated gene expression of the Fingered Citron (*Citrus medica* L. var. *sarcodactylis* Swingle)
..... CHEN Wenrong, YE Jiejun, LI Yongqiang, et al (1594)
- Hosts preference of *Echinothrips americanus* Morgan for different vegetables ... ZHU Liang, SHI Baocai, GONG Yajun, et al (1607)
- Induction effects of jasmonic acid on tannin content and defense-related enzyme activities in conventional cotton plants
..... YANG Shiyong, WANG Mengmeng, XIE Jianchun (1615)
- Effects of irrigation with paper mill effluent on growth and nutrient status of *Populus tomentosa* seedlings
..... WANG Ye, XI Benye, CUI Xiangdong, et al (1626)
- Water use efficiency of Jiangsu Province based on the data envelopment analysis approach
..... ZHAO Chen, WANG Yuan, GU Xueming, et al (1636)
- Research Notes**
- Characteristics of precipitation distribution in *Pinus tabulaeformis* plantations under different canopy coverage in Taiyue Mountain
..... ZHOU Bin, HAN Hairong, KANG Fengfeng, et al (1645)
- Driving factor analysis on the vegetation changes derived from the Landsat TM images in Beijing JIA Baoqun (1654)
- Effects of *Mikania micrantha* wilt virus infection on photosynthesis and the activities of four enzymes in *Mikania micrantha* H. B. K.
..... WANG Rui long, PAN Wanwen, YANG Jiaoyu, et al (1667)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于1981年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科研工作者,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科研人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的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;新书评价和学术、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,300页,国内定价90元/册,全年定价2160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

(SHENTAI XUEBAO)

(半月刊 1981年3月创刊)

第33卷 第5期 (2013年3月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 5 (March, 2013)

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
主 编	王如松
主 管	中国科学技术协会
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
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717
印 刷	北京北林印刷厂
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街16号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局
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
广 告 经 营	京海工商广字第8013号
许 可 证	

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
Editor-in-chief	WANG Rusong
Supervised by	China Association for Science and Technology
Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
Domestic	All Local Post Offices in China
Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China



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 90.00 元