

文章编号:1672-3031(2019)01-0039-06

北洛河流域水沙变化对降雨和土地利用的响应

谢 敏, 张晓明, 赵 阳, 王昭艳

(中国水利水电科学研究院 泥沙研究所, 北京 100048)

摘要: 研究流域水沙变化对降雨和土地利用变化的响应机理, 对流域土地利用规划决策及水土保持措施优化配置具有重要意义。本文以黄土高原北洛河流域为研究对象, 采用Pettitt突变检验、双累积曲线等方法, 定量分析了流域近60年降雨、径流和输沙的演变规律及土地利用变化特征, 探讨了流域降雨和土地利用变化对流域水沙的影响。结果表明: 1960—2016年间, 北洛河流域降雨随时间变化总体趋势不显著, 而径流量和输沙量随时间变化表现为明显的下降趋势, 下降幅度分别为31.4%和83.5%, 输沙量减少趋势尤为显著; 研究时段内, 北洛河流域以林地、草地和耕地为景观基质, 耕地、草地向林地转化是基本特征; 人类活动影响下的土地利用变化是造成径流泥沙量减少的主要原因, 其对径流输沙量减少贡献率分别为76.9%和96.6%, 降雨变化影响贡献率分别为23.1%和3.4%。研究结果为深刻认识黄河水沙动态变化提供依据, 对未来水土保持措施优化配置提供决策支撑。

关键词: 北洛河; 径流; 输沙; 土地利用

中图分类号: TV133

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2019.01.006

1 研究背景

自1990年代以来, 黄土高原大范围退耕还林还草、水土保持综合治理等生态修复工程的实施对区域下垫面产生了极大影响。在气候暖干化耦合影响下, 黄河干流及其支流水沙量及水沙关系发生了显著变化^[1-3]。国内外学者就黄河流域径流泥沙变化主要驱动因素进行了大量研究^[4-6]。其中, 部分研究认为人类活动是黄河流域水沙变化的主要驱动因素^[7-9], 如: 王国庆^[10]就汾河径流锐减驱动因素分析表明, 人类活动对汾河径流减少的贡献率占64.1%, 而气候要素贡献率仅占35.9%; 杨新^[11]明确指出人类活动是无定河流域径流变化的主要因子。此外, 部分学者认为气候变化是主因。李焯^[12]对黄河干流河龙区间水沙变化的研究则表明, 1970年后降水变化对输沙量减少的影响起到主要作用, 贡献率在42%~60%, 人类活动的影响则逐步降低; 李春晖^[13]的研究同样表明降水量减少是1990年代早期或中期黄河天然径流量减少的主要原因; 刘昌明等^[14]对1956—2000年黄河干流的径流量分析发现黄河上游径流量减少降水贡献率为75%, 而人类活动仅占25%; Miao等^[15]通过分析1970—2008年黄河干流水沙变化情况, 发现人类活动和气候变化对黄河上、中、下游的贡献比例各不相同。从以上研究可知, 人类活动和气候变化对流域水沙的影响受流域大小、形状、下垫面情况以及研究时段等不同而有所差异。黄河水沙变化是一个时间上差别大、空间上分异性强的复杂问题, 开展流域水沙变化对气候和土地利用的响应研究对于深刻认识黄河水沙锐减成因具有重要意义。

北洛河作为黄河一级支流渭河的主要支流, 为多泥沙河流, 近年来随着森林植被逐年向好, 流域水沙情势发生巨大变化, 客观准确评估流域水沙锐减成因对于预判流域未来水沙情势, 调整流域治理策略具有重要意义。为此, 本文以北洛河流域为典型流域, 开展流域水沙变化对降雨和土地利用变化的响应研究, 旨在深刻剖析区域水沙变化成因, 为流域水土资源优化管理提供参考。

收稿日期: 2018-03-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402407); 国家自然科学基金项目(L1624052, 41501041); 流域水循环模拟与调控国家重点实验室基金(SK12018CG04)

作者简介: 谢敏(1993-), 硕士生, 主要从事水土保持与荒漠化研究。E-mail: xiemin19930216@163.com

通讯作者: 赵阳(1986-), 博士, 高级工程师, 主要从事流域水文研究。E-mail: zhaoyang1224@163.com

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况 北洛河发源于陕西省定边县白于山南麓的魏梁山，由大荔县东南注入渭河，是渭河较大一级支流，属黄河中游二级支流，总长680 km，流域面积26 900 km²。该流域地处黄河中游地区，地形地貌复杂，地貌类型自上而下主要有黄土丘陵沟壑、高原沟壑、阶地和冲积平原。该流域属大陆性季风气候，年平均降水量520 mm，由南向北、由东向西递减，年内分布不均，多集中在7—9月，多以夏季暴雨形式出现，占全年降水量一半，破坏性大，水土流失极为严重。上中游主要土壤类型为风沙土、黄绵土、黑钙土，土壤颗粒结构多孔，易塌陷流失，仅下游的黑垆土和水稻土利于农业生产。流域多年来为退耕还林重点区域，以农牧地为主的土地利用结构大量向落叶阔叶生态和经济林及灌木草丛转变，增加的林草覆盖面积多为次生植被区。

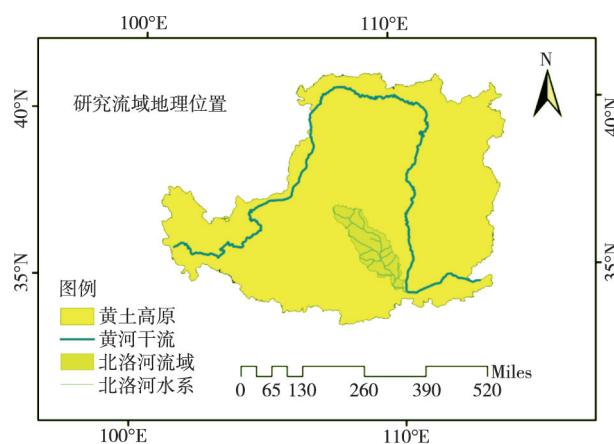


图1 北洛河流域地理位置

2.2 数据来源 北洛河流域水文气象数据(1960—2016年)来自于北洛河把口水文站状头站。北洛河土地利用数据主要基于流域1976、1998和2010年3期遥感数据，结合流域1:10000地形图，选择高斯-克里格投影，采用二次多项式法几何校正(校正误差不超过0.5个像元)对影像进行处理，参考2007年《中国土地分类系统》，分析流域3期土地利用状况^[16]。

3 研究方法简介

3.1 Pettitt突变检验 Pettitt突变检验法是基于非参数检验时间序列突变点检验的一种方法^[17]。该方法计算较简单，能够很好的识别水文时间序列的突变点，在突变点检验中应用较多。

3.2 双累积曲线法 此方法用于分析两参数间的趋势性变化。双累积曲线线性增加对应的是参数间趋势保持不变，反之当双累积曲线出现拐点，则对应趋势发生改变^[18]。

3.3 分离评判法 该方法认为径流、泥沙的变化量由降雨和人类活动两部分因素引起。

本研究以降雨-径流量/降雨-输沙量双累积曲线为依据，以曲线的转折点划分基准期和措施期，以此来反映人类活动对径流量/输沙量的影响。

经回归分析求得累积年降雨量与累积年径流量/累积年输沙量的线性相关方程，将流域治理后不同时间段的累积年降雨量值分别代入方程中，求得累积年径流量/累积年输沙量，然后与同期实测值比较，即得减沙效应。计算公式如下：

$$\eta = \frac{R_1 - R_2}{R_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中： R_1 为利用累积降雨量-累积年径流量/累积年降雨量-累积年输沙量的线性相关方程计算出的年

径流量/年输沙量； R_2 为流域治理后的实际年径流量/实测年输沙量。

通过建立基准期降雨-径流/降雨-输沙关系，用以计算措施期预期自然径流量/自然输沙量，将其与基准期平均径流量/输沙量相比得到降雨变化对径流/输沙的影响量，将其与实际观测径流量/输沙量对比，得到人类活动影响量^[19]：

$$\Delta T = Q_{T_2} - Q_{T_1} = \Delta T_1 + \Delta T_2 \quad (2)$$

$$\Delta T_1 = Q_{T_2} - Q'_{T_2} \quad (3)$$

$$\Delta T_2 = Q'_{T_2} - Q_{T_1} \quad (4)$$

式中： ΔT 为流域径流/输沙变化总量； Q_{T_2} 是措施期实测径流量/输沙量； Q_{T_1} 是基准期径流量/输沙量之差； ΔT_1 是人类活动的影响量； ΔT_2 是降雨变化的影响量； Q'_{T_2} 是措施期计算径流量/输沙量。

4 研究结果与分析

4.1 流域降水及水沙过程年际变化规律 从图2(a)中线性趋势线的走势中可看出，北洛河流域降水呈现出一定的下降趋势，但不显著($P>0.05$)。北洛河年均降水量为486.5 mm，其中最大和最小降水量分别为853.7 mm和243.8 mm。从5a滑动平均趋势线可看出北洛河流域降水变化不显著，在1960—1970年下降、在1970—1980年先升后降、在1980—1990年先升后降。从图2(b)线性趋势线的走势来看，北洛河径流量呈显著下降趋势($P<0.05$)，经Pettitt突变检验可知，径流量发生突变年份为1994年，相对于突变前时期径流量降幅为31.43%。北洛河平均年径流量为 $8.24 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，其中最大和最小径流量分别为 $20.13 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $4.04 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。从5a滑动平均趋势线可看出北洛河在20世纪60—70年代和90年代后径流量为明显的下降趋势。从图2(c)中可看出北洛河输沙量同样呈显著下降趋势($P<0.05$)，经Pettitt突变检验可知，输沙量发生突变年份为2002年，相对于突变前时期输沙量降幅为83.53%。北洛河年均输沙量为 $0.583 \times 10^8 \text{ t}$ ，其中最大输沙量和最小输沙量分别为 $2.142 \times 10^8 \text{ t}$ 和 $0.008 \times 10^8 \text{ t}$ ，输沙量的年际变化很大。从5a滑动平均趋势线可看出，虽然年际间存在波动变化，但从1970年代开始输沙量有了明显下降。

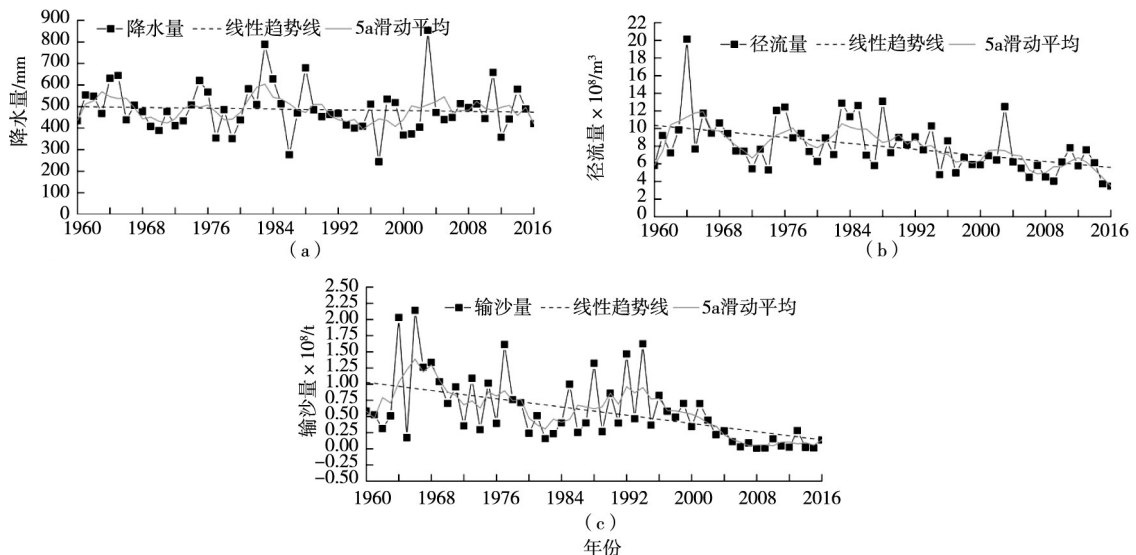


图2 北洛河流域水文要素变化趋势

4.2 流域土地利用变化 从图3中可看出，1976年北洛河流域林地、草地、耕地、其他所占比重分别为27%、38%、33%、2%；1998年所占比重分别为29%、37%、32%、2%；2010年所占比重为46%、28%、24%、2%。总体而言，北洛河流域在1976—1998年间土地利用主要类型林地、草地和耕地，并未发生明显变化；由于1990年代末退耕还林、水土保持综合治理等生态修复工程的实施，流域下垫面发生了变化，图中分析可看出1998—2010年间土地利用发生明显变化。具体表现为

林地面积增加达 17%，耕地和草地面积各减少约 9%。这说明此时段内有明显的土地类型的转移，耕地和草地转化为林地；研究期间水域和未利用地无明显变化，城镇单向逐渐增加。流域水沙锐减与流域土地利用变化规律在趋势上有很吻合度。

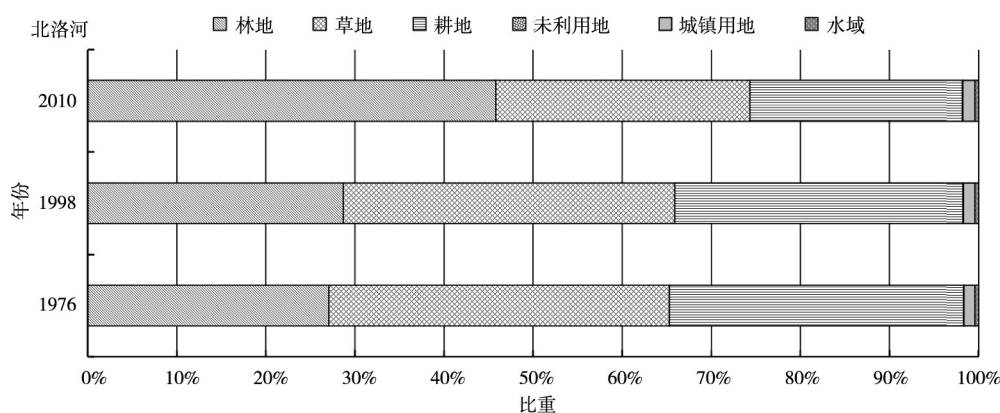


图3 北洛河流域土地利用面积变化

4.3 土地利用变化对水沙过程的定量影响 为区分降雨和人类活动对北洛河流域水沙变化的影响，结合径流输沙 Pettitt 突变检验结果，用降雨-径流量、降雨-输沙量的双累积曲线进行降雨和人类活动对径流量和输沙量贡献率的模拟回归分析。降雨-径流量、降雨-输沙量的双累积曲线的斜率分别代表单位降水所产生的径流量和输沙量。自然条件下，降雨与径流量、降雨与输沙量的关系应该是一定的。如果流域环境发生了变化，则水沙关系必然发生变化，降雨-径流量、降雨-输沙量的双累积曲线斜率会发生明显的转折。当曲线发生转折时，说明下垫面受人类活动影响发生改变，从而影响径流量和输沙量。

从下图中可看出，北洛河流域降雨-径流量、降雨-输沙量的双累积曲线图中存在转折点。据此可划分为基准期和变化期。第一次突变前的时期，相对于突变后的时期可看作为径流输沙的天然时段，流域下垫面产流产沙受降雨外的其他条件影响极弱。变化期降雨-径流量、降雨-输沙量的双累积曲线图的斜率均较上一时段减小，说明其为显著下降阶段，下垫面受人类活动影响显著。结合已有研究，土地利用变化作为人类活动的主要表现形式之一，其变化会通过改变流域下垫面糙度对流域汇流、侵蚀产沙造成影响，进而改变流域水沙情势。结合上文土地利用变化分析，发现林草等类型与径流泥沙变化趋势相吻合，进一步印证林草面积变化在流域调水保土方面效益显著。因而本研究以土地利用变化来反映人类活动对径流泥沙变化量的贡献率。

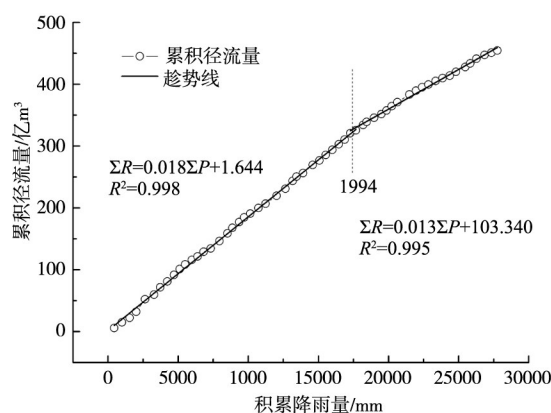


图4 北洛河流域不同时段降雨-径流量双累积曲线

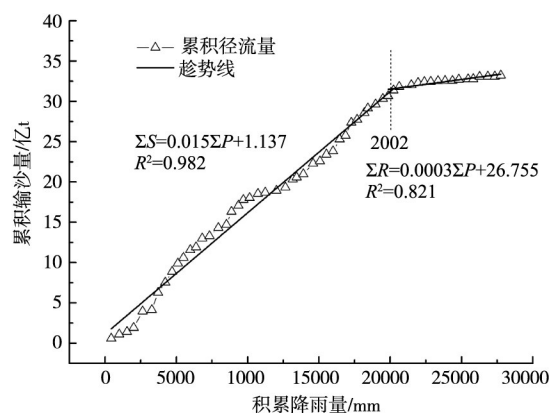


图5 北洛河流域不同时段降雨-输沙量双累积曲线

根据北洛河流域降雨-径流量、降雨-输沙量双累积曲线的变化趋势及突变点，对流域径流输沙研究时间序列进行了阶段划分，并分别计算了北洛河流域降雨变化和土地利用变化对流域径流输沙的定量影响。

表1 线性回归方程拟合

北洛河	自然阶段(第一阶段)累积回归方程
降雨—径流量	$\Sigma R=0.018 \Sigma P+1.644(R^2=0.998, N=35)$
降雨—输沙量	$\Sigma S=0.0015 \Sigma P+1.137(R^2=0.982, N=43)$

表2 北洛河流域径流输沙量对降雨和土地利用变化的响应

	年份	降水量/mm	实测年均量	计算年均量	总减少量	降雨变化		土地利用变化	
						影响量	贡献率/%	影响量	贡献率/%
径流/亿 m ³	1960—1994	17270.1	9.167	—	—	—	—	—	—
	1995—2016	10488.6	6.080	8.455	3.087	0.712	23.1%	2.375	76.9%
输沙/亿 t	1960—2002	20631.2	0.740	—	—	—	—	—	—
	2003—2016	7127.5	0.101	0.764	0.639	-0.024	3.4%	0.663	96.6%

由表1、表2可知,北洛河流域土地利用变化对流域径流影响贡献率为76.9%,降雨贡献率为23.1%;土地利用变化对流域输沙量影响贡献率为96.6%,降雨贡献率仅为3.4%。总体而言,土地利用变化是研究流域径流量、输沙量变化的主要影响因素。

5 结论

本文以黄河中游的北洛河流域为研究对象,采用Pettitt突变检验法、双累积曲线以及分离评判等方法,定量分析了流域近60年降水、径流和输沙的演变规律及研究区土地利用变化特征,探讨了流域降雨和土地利用变化对流域水沙量锐减的影响。研究结论主要归纳如下:

(1)1960—2016年间,北洛河流域降雨随时间变化总体趋势不显著,而径流量和输沙量随时间变化表现为明显的下降趋势,下降幅度分别为31.4%和83.5%,输沙量减少趋势尤为显著。

(2)研究时段内,北洛河流域以林地、草地和耕地为景观基质,耕地、草地向林地转化是基本特征。1976—1998年土地利用类型未发生明显变化,1998—2010年,土地利用类型表现为林地面积增加达17.0%,耕地和草地面积各减少约9.0%。

(3)总体而言,土地利用变化是北洛河流域径流输沙发生变异的主要驱动因素,对径流泥沙量减少的贡献率分别为76.9%和96.6%;而降水影响贡献率则较小。但较之土地利用变化对径流影响而言,土地利用变化对流域输沙量的影响更大。

参 考 文 献:

- [1] 周旭,杨胜天,刘晓燕,等.黄河中游多沙粗沙区流域坡面水保措施变化特征[J].地理学报,2014,69(1):64-72.
- [2] LIU C, SUI J Y, WANG Z Y. Changes in runoff and sediment yield along the Yellow River during the period from 1950 to 2006[J]. Journal of Environmental Informatics, 2008, 12(2): 129-139.
- [3] 李庆云.黄土丘陵区流域径流泥沙对气候变化和高强度人类活动响应研究[D].北京:北京林业大学,2011.
- [4] 田清.近60年来气候变化和人类活动对黄河、长江、珠江水沙通量影响的研究[D].上海:华东师范大学,2016.
- [5] 冉大川,姚文艺,申震洲,等.黄河头道拐水沙变化多元驱动因子贡献率分析[J].水科学进展,2015,26(6):769-778.
- [6] YAO H, SHI C, SHAO W, et al. Impacts of climate change and human activities on runoff and sediment load of the xiliugou basin in the upper yellow river[J]. Advances in Meteorology, 2015, 2015(3): 1-12.
- [7] 赫晓慧,郑紫瑞,高亚军.降水和人类活动对北洛河径流变化的定量化研究[J].水土保持研究,2017,24

- (3): 125-129.
- [8] 张君茹, 岳大鹏, 达兴, 等. 气候变化和人类活动对延河流域泥沙影响的定量分析[J]. 山东农业科学, 2017, 49(3): 106-112.
- [9] 郑培龙, 李云霞, 赵阳, 等. 黄土高原泾河流域气候和土地利用变化对径流产沙的影响[J]. 水土保持研究, 2015, 22(5): 20-24.
- [10] 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.
- [11] 杨新, 延军平, 刘宝元. 无定河年径流量变化特征及人为驱动力分析[J]. 地球科学进展, 2005, 20(6): 637-642.
- [12] 李焯, 黄河河口镇-龙门区间年输沙量变化原因分析[J]. 人民黄河, 2008, 30(8): 41-42.
- [13] 李春晖, 郑小康, 杨志峰, 等. 黄河天然径流量变化趋势及其影响分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2009, 45(1): 80-85.
- [14] 刘昌明, 张学成. 黄河干流实际来水量不断减少的成因分析[J]. 地理学报, 2004, 59(3): 323-330.
- [15] MIAO C Y, NI J R, BORTHWICK A G L, et al. A preliminary estimate of human and natural contributions to the changes in water discharge and sediment load in the Yellow River[J]. Global and Planetary Change, 2011, 76(3-4): 196-205.
- [16] 吴琳娜, 杨胜天, 刘晓燕, 等. 1976 年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的响应[J]. 地理学报, 2014, 69(1): 54-63.
- [17] PETTITT A N. A non-parametric approach to the change-point problem[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1979, 28(2): 126-135.
- [18] 刘成, 王兆印, 隋觉义. 我国主要入海河流水沙变化分析[J]. 水利学报, 2007, 38(12): 1444-1452.
- [19] 王国庆. 气候变化对黄河中游水文水资源影响的关键问题研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.

The mechanism of response of runoff and sediment yield to precipitation and LUCC in Beiluohe River basin

XIE Min, ZHANG Xiaoming, ZHAO Yang, WANG Zhaoyan

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: In the Loess plateau, analyzing the response mechanism of runoff and sediment yield to precipitation and land-use change plays an important role in the ecological regulation decision-making and the optimal allocation of soil and water conservation measures. Therefore, we choose Beiluohe River basin as the object to quantitatively research precipitation, runoff and sediment change and the characteristics of land-use change in nearly 60 years based on the Pettitt test and double mass analysis, and then to discuss the effect of the precipitation and land use change to runoff and sediment yield. The results showed that: (1) Trends of annual precipitation, runoff and sediment change decreased by the year. (2) Land use structure has greatly changed in recent decades. Major land use types of the Beiluohe River are forestland, grassland and farmland, and the main change was the conservation of grassland and farmland to the forestland (3) The effect of land-use and land-cover change under human activities to runoff and sediment contribution rates was 76.9% and 96.6% respectively, but the precipitation change contributed less. The results provide a basis for the deep understanding of the dynamic changes of the Yellow River's water and sediment, and provide decision support for the future optimization of water and soil conservation measures.

Keywords: Beiluohe watershed; runoff and sediment yield; land-use and land-cover change

(责任编辑: 李福田)