

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.03.002

汉江流域陕西段非点源污染特征解析

李家科¹, 郝改瑞¹, 李舒¹, 彭凯¹, 宋嘉¹, 韩蕊翔¹, 张子航²

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 基于收集的汉江流域陕西段 27 个气象站点的逐日降雨数据、安康站水量水质数据及 2017 年流域内各区县统计年鉴数据, 利用小波分析法、径流分割法、输出系数法及等标污染负荷法等方法分析降雨周期及空间分布、非点源污染负荷通量量化及农业源污染负荷空间分布特性三方面内容。结果表明: 1) 研究区域降雨量有 27 a 的主周期, 降雨量和降雨强度空间分布趋势不一致, 但高值中心均位于镇巴县; 2) 汉江干流安康段 2011—2017 年的水文频率在 5%~97% 之间, 非点源污染物 TN、TP、COD、NH₃-N 通量的多年均值分别为: 4 260.1 t、351.8 t、8.67 万 t 和 1 987.6 t, 其占比在 41.4%~86.7% 之间; 3) 等标污染负荷空间分布有较强的一致性, TN 污染主要来源是农业用地, TP、NH₃-N 污染主要来源是畜禽养殖, COD 污染主要来源是农村生活。未来汉江流域陕西段非点源污染治理应根据各区县污染源情况制定因地制宜的方案, 最大程度地减轻源头污染。

关键词: 汉江流域陕西段; 非点源污染; 小波分析; 径流分割法; 关键源区识别

中图分类号: X522

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2020)03-0275-11

Analysis of non-point source pollution characteristics in Shaanxi section of Hanjiang River Basin

LI Jiake¹, HAO Gairui¹, LI Shu¹, PENG Kai¹, SONG Jia¹, HAN Ruixiang¹, ZHANG Zihang²

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The daily rainfall data from 27 meteorological stations in the Shaanxi section of the Hanjiang River Basin, runoff and water quality data from Ankang hydrologic station, and statistical yearbook data from each district and county in 2017 are collected. The methods for wavelet analysis, runoff segmentation, output coefficient and equivalent standard pollution load are used to analyze the rainfall cycle and spatial distribution, non-point source pollution load flux quantification, and the spatial distribution characteristics of agricultural source pollution load. The results show that the rainfall has a main period of 27 a, and that the spatial distribution trends of rainfall and rainfall intensity are inconsistent, but the high value centers are located in Zhenba County. From 2011 to 2017, the hydrological frequency of the basin above the Ankang Hydrological Station of Hanjiang River is between 5% and 97%. The multi-year average fluxes of non-point source pollutants TN, TP, COD and NH₃-N are 4 260.1 t, 351.8 t, 86 700 t and 1 987.6 t, respectively, with their proportions between 41.4% and 86.7%. The spatial distribution of equivalent standard pollution load has a strong consistency. The main source of TN pollution is from agricultural land. The main source of TP and NH₃-N pollution is from livestock and poultry breeding, and the COD pollution from rural life. In the future, the non-point source pollution control in the Shaanxi section of the Hanjiang River Basin should formulate a local scheme based on the pollution situation of each district and county in minimizing source pollution.

收稿日期: 2020-09-01; 网络出版日期: 2020-09-28

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20200928.1548.021.html>

基金项目: 陕西省重点研发资助项目(2019ZDLSF06-01); 国家自然科学基金资助项目(51879215)

第一作者: 李家科, 男, 博士, 教授, 研究方向为非点源污染控制与城市雨洪管理。E-mail: xuat_ljk@163.com

Key words: Shaanxi section of Hanjiang River Basin; non-point source pollution; wavelet analysis; runoff split method; critical source area identification

2020年汛期以来,长江、黄河流域相继出现编号洪水,从全国范围来说,在地形地貌及季风气候等自然要素的影响下,降雨有比较明显的地域特征,黄河上下游、华南南部及长江中下游等地区极端降水的频率增加^[1-4]。强降雨会导致污染物随径流迁移进入受纳水体,从而造成水环境污染^[5]。根据2020年6月8日发布的第二次全国水污染源普查公报^[6],通过对工业源、农业源、生活源、集中式污水处理设施及移动源进行普查,2017年全国水污染排放量中,COD、NH₃-N、TN和TP分别为2 143.98万t、96.34万t、304.14万t和31.54万t,七大流域水污染排放达到全国总量的90%左右;其中农业源和农村生活源贡献的COD、NH₃-N、TN和TP的污染物量占比达到65%左右,说明非点源污染对各流域水环境污染的影响巨大。在国家实施的黄河流域生态保护和高质量发展及长江大保护战略中,流域面临的不同污染源造成的非点源污染是重要问题,全球气候变化对非点源污染过程的影响也是不可忽视的问题^[7]。随着秦岭环境大保护的深入和南水北调工程的建设,汉江流域陕西段水质优劣及周围生态环境情况与沿线受水区经济社会发展和人民群众生活密切相关。从国家层面和地方需求两方面说明了对流域非点源污染特征解析的必要性,也为后续非点源污染的防控提供有力的科技支撑。

汉江是长江的一级支流,属于中国南北的分界线,流域气候效应、径流机制、环境效应及水文效应都很复杂。众多学者针对汉江流域的极端降水的分布、降水径流的变化趋势及突变、非点源污染、水资源评估、水生态承载力、水环境模拟、气候植被响应等方面做了大量研究工作^[8-13]。汪成博等^[14]发现汉江流域的极端降水呈现“东部早,西部迟”的分布特征,极端降水量受季风强弱程度的影响。李丹等^[15]分析了汉江流域降雨极值的时空变化特征。张军等^[16]在汉江流域上确定了农业非点源污染分区。目前汉江流域降水特征分析侧重于变化趋势及突变检验,且站点数量有限,对降水周期诊断和空间分布的研究较少;汉江流域陕西段非点源污染的源解析及负荷估算方面,污染种类及来源不明,缺乏污染现状及污染物空间分布特征分析;主要针对TN、TP两个监测指标,对COD和NH₃-N等污染指标分析少见。

本文基于汉江流域陕西段水源区27个气象站的1971—2018年的逐日降水数据,利用Thiessen

多边形法求出逐日降雨序列,分析降雨量和降雨强度在过去48年的时空变化情况及判断其降雨量周期,并分析其时空分布特性。污染物在降雨径流的冲刷下会进入受纳水体,分析流域非点源污染的污染种类及来源,从时空尺度分析非点源污染的特征,为水源区暴雨灾害防治、生态建设、水环境污染及水资源管理等方面提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

汉江流域陕西段位于北纬31°42′~34°11′,东经103°47′~111°18′,流域面积62 723 km²,包括在陕西境内的汉江干流和丹江支流(见图1),横跨了陕南地区汉中、安康和商洛3个市。该流域属于亚热带半湿润气候,河流分布较密,水资源丰富,雨量主要贡献月份为6~9月,多年平均降水量为700~1 800 mm,年均温度15.24℃。林草地和耕地在流域内的所占比例约为98.88%,以旱作物为主,农业生产基础条件较差。流域由秦巴山地及汉江盆地组成,所以地形起伏较大。

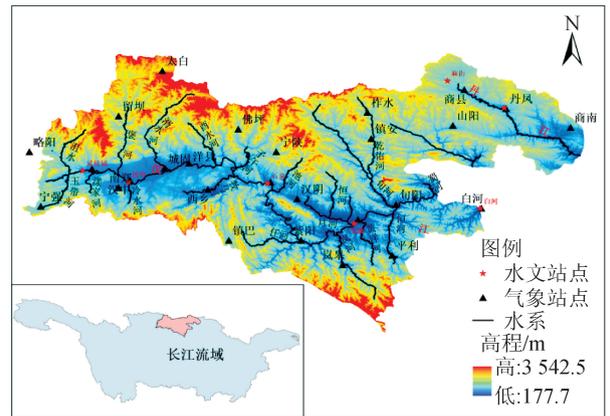


图1 汉江流域陕西段示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Shaanxi section of Hanjiang River Basin

1.2 数据来源

本研究使用数据包括如下。

- 1) 汉江流域陕西段数字高程模型DEM,下载自地理空间数据(<https://www.gscloud.cn>)。
- 2) 建站年—2018年27个气象站逐日降雨数据,来自中国科学院资源环境科学数据中心(站点见图1,<http://www.resdc.cn/Default.aspx>)。
- 3) 土地利用数据来自全球生态环境遥感监测平台(<http://data.ess.tsinghua.edu.cn/>)。

4) 畜禽养殖及农村人口数据来源于 2018 年陕西省汉中、安康、商洛各市县的统计年鉴或国民经济和社会发展统计公报。

5) 安康水文站 2011—2017 年逐日流量数据来源于长江流域汉江区汉江上游水系水文年鉴;安康断面 2011—2017 年水质监测数据来自陕西省环境监测站。

1.3 研究方法

1.3.1 小波分析法

采用小波分析法对研究区域降雨量进行周期诊断。此方法具有多分辨、多时间尺度、多层次的特点,比较关键的是小波函数,能够迅速衰减且具有震荡性的一类函数,公式为:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (1)$$

式中: $\psi(t)$ 为基小波函数,可通过平移和伸缩形成一簇小波函数:

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

式中: $\psi_{a,b}(t)$ 为子小波函数; a, b 分别为尺度因子和平移因子, $a > 0$ 。

时间序列 $f(t)$ 的连续小波变化为:

$$W_f(a,b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

式中: $\bar{\psi}(t)$ 为 $\psi(t)$ 的复共轭函数; $W_f(a,b)$ 表示 f 的小波变换系数。

设函数 $f(k\Delta t)$ 代表离散数据序列,其小波形式为:

$$W_f(a,b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(k\Delta t) \bar{\psi}\left(\frac{k\Delta t - b}{a}\right) dt \quad (4)$$

式中: $k=1, 2, \dots, N$; Δt 为取样间隔。通过小波系数可分析数据序列的时间和频率变化特征。

小波方差就是对小波系数的平方值在时间域上的积分,计算公式为:

$$\text{Var}(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(a,b)|^2 db \quad (5)$$

式中: $\text{Var}(a)$ 为数据序列在时间尺度上的小波方差,可用来判断数据序列的主副周期^[17]。

1.3.2 径流分割法

基于实际监测的水文水质数据可进行污染源解析和通量计算。对于实际污染负荷的计算可以先按流域时段通量平均浓度与时段平均流量之积来计算丰平枯各水期的负荷,然后求和得到出口断面总负荷量,该方法强调时段总径流量的作用,适合非点源占优特征的污染物负荷估算,公式为^[18]:

$$L = K \frac{\sum_{i=1}^n C_i Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \bar{Q}_y \quad (6)$$

式中: L 表示年负荷(t); $i=1, 2, 3, \dots, n$, n 代表取样次数; C_i 为第 i 次采样瞬时浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); Q_i 为第 i 次采样瞬时流量($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$),若缺乏瞬时流量数据可采用水文站逐日流量数据; \bar{Q}_y 为各水期时段平均流量($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); K 为估算时段时间转换系数。

径流分割法认为枯水季节水质污染主要由点源污染引起,而汛期地表径流主要带来非点源污染,即^[18]:

$$L = L_n + L_p = L_n + 12L_d \quad (7)$$

式中: L 为出口断面年总负荷量(t); 12 为一年 12 个月; L_n, L_p, L_d 分别代表的是非点源、点源及枯季月污染的负荷(t)。

1.3.3 输出系数法及等标污染负荷法

农业源污染物在非点源污染治理中是不可忽略的关键部分,在研究区域面积太大的情况下可采用合理的方法估算农业源污染物流失量,进一步分析非点源污染空间分布特性并识别关键源区。文中采用输出系数法估算汉江流域陕西段各区县的非点源污染负荷,公式为^[19]:

$$L_i = \sum_{j=1}^m E_{ij} A_j + p \quad (8)$$

式中: L_i 为污染物 i 的输出负荷量($\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$); A_j 为第 j 种土地利用类型面积(hm^2)或第 j 种畜禽养殖(头)、人口数量(人); E_{ij} 为在第 j 种土地利用类型、第 j 种畜禽养殖或人口因素情况下的第 i 种污染物的输出系数取值($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $\text{kg} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $\text{kg} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$); p 为降雨全过程中输入的污染物总量($\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$),由于其量值极小,在本式中可忽略不计。

在同一标准上对不同污染物进行比较可采用等标污染负荷法。等标污染负荷量是指在单位时间段内排出含有某种污染物的水体的等标体积^[20],公式为:

$$P_{ij} = L_{ij} / c_{0i} \quad (9)$$

式中: c_{0i} 为污染物 i 的评价标准值; P_{ij} 为污染源 j 中的污染物 i 的等标污染负荷量($10^6 \text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$); L_{ij} 为污染源 j 中的污染物 i 的总负荷量($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$)。

汉江流域陕西段内水质情况普遍为 II-III 类,结合水资源及各区县的环境状况公报中水质的实际状况,采用《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中 II 类标准阈浓度的下限值进行等标处理核算(其中 TN、TP、COD 及 $\text{NH}_3\text{-N}$ 值分别为 0.5mg/L 、 0.1mg/L 、 15mg/L 及 0.5mg/L)。

2 结果与分析

2.1 降雨周期诊断及空间分布特征

非点源污染物的自然驱动力为降雨径流,其中降雨量、降雨强度及其时空分布对地表径流的产生起决定性作用,从而引发污染物的迁移转化^[21-23]。根据收集的气象站点逐日降雨数据计算出汉江流域陕西段降雨量和降雨强度。为保证数据的可靠性、一致性和代表性,降雨数据研究时段确定为1971—2018年,序列长度48年。小波分析法主要是对降雨量的周期性进行判断,利用Thiessen多边形法处理研究区域气象站点的降雨量数据,并采用反距离加权(IDW)插值法对降雨量和降雨强度进行空间插值,从而分析其特征。

2.1.1 降雨周期诊断

过去48年汉江流域陕西段降雨量的小波变化图见图2,可看出降雨量有7a和27a两个周期。在10a以下尺度上降雨量周期规律不明显;在15~40a尺度上存在27a的主周期,有比较明显的3个循环交替的周期规律,其中偏丰期、偏枯期交替突变的点出现在1983年和2000年。

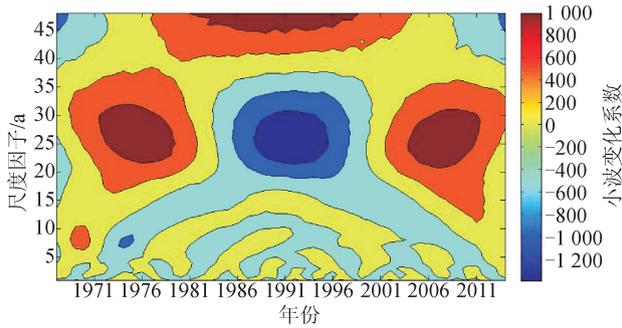


图2 汉江流域陕西段降雨量周期分析图

Fig. 2 Analysis chart of rainfall cycle in Shaanxi section of Hanjiang River Basin

2.1.2 降雨空间分布

汉江流域陕西段属于东南季风与西南季风的过渡带,降雨量较多的发生在夏季风期间,结合站点分布位置可得到降雨量空间分布状况。采用IDW插值法对1971—2018年汉江流域陕西段27个气象站的降雨量和降雨强度的多年均值进行插值,其空间分布结果见图3。降雨量空间分布呈现由北到南逐渐增大的趋势(见图3(a)),其中高值中心($>1\ 230$ mm/a)位于镇巴县,低值中心(<690 mm/a)位于商县。降雨强度空间分布呈现由南到北递减的趋势(见图3(b)),形成镇巴县高值中心(>9.2 mm/d)和太白县低值中心(<6.0 mm/d)。对于全国而言,年平均降雨量变化较小,但是降雨强度呈上升趋势,

极端降雨(暴雨和大雨)逐渐增加^[6]。作为降雨量和降雨强度最高的镇巴县,特别要重视极端降雨事件、土壤侵蚀问题及其他水灾害问题。例如2020年6月17日汉中市镇巴县发生了特大暴雨,最大6小时降雨量为169 mm,日降雨量达到了213.4 mm,与其相邻的紫阳县及洋县的降雨量也达到了130.0 mm和120.4 mm。2020年8月6日商洛市洛南县也发生了暴雨,日降雨量达到了181 mm,造成5人死亡、10人失联,暴雨洪涝灾害造成石门、麻坪二镇灾情严重,其中农作物受灾、房屋倒塌及水毁公路等带来的直接经济损失19.28亿元。强降雨极易引发地质灾害,暴雨径流中混合各种地表沉积物和泥沙,会导致不同种类和形态的非点源污染物汇入河道中,从而引发严重的水环境问题。

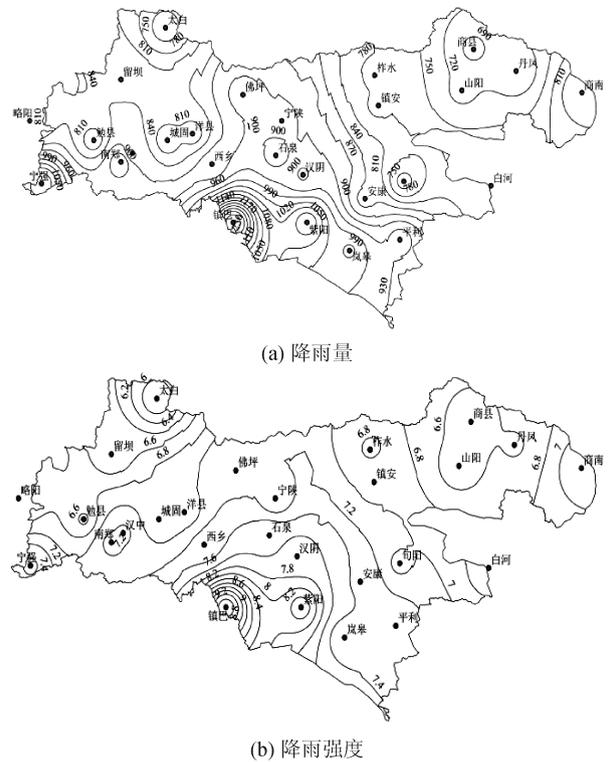


图3 汉江流域陕西段降雨量及降雨强度空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution of rainfall and rainfall intensity in Shaanxi section of Hanjiang River Basin

2.2 非点源污染负荷通量计算

安康水文站位于汉江干流河段,在汉江流域陕西段下游,属于国家级重要水文站。基于收集的安康站2011—2017年水量水质数据,采用径流分割法量化出非点源污染负荷通量。汉江流域陕西段降雨主要集中在6~9月,降雨量占全年降雨量的63%左右,12月~来年2月为枯水期,降雨只占全年的3%左右,因此将全年水期划分为丰水期(6~9月)、平水期(3~5月,10~11月)和枯水期(12~2月)。

首先将汉江安康水文站以上流域各年的径流量(2011—2017年)利用P-III型频率曲线确定各年水文频率,并对各年的径流量进行丰平枯水期的分割,结合水质水量数据确定各丰平枯水期的流量加权浓度,结果见表1。然后利用式(6)计算出不同水

期的通量并进行求和,将枯水期产生的污染负荷量的月平均值作为 L_d ,可求出点源污染负荷,年总负荷量与点源污染负荷之差即为非点源污染负荷,结果见表2。

表1 汉江安康水文站以上流域2011—2017年不同水期的径流量及加权浓度统计表

Tab.1 Statistical table for runoff and weighted concentration in different water periods of the basin above the Ankang Hydrological Station of Hanjiang River in 2011—2017

年 份		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
水文频率 $P/\%$		97	66	47	50	30	5	59
径流量/ (10^8 m^3)		211.63	122.45	107.10	89.54	67.10	42.27	69.76
丰 水 期	$\text{NH}_3\text{-N}$	0.148	0.226	0.212	0.168	0.207	0.102	0.079
	TP	0.048	0.032	0.045	0.024	0.017	0.022	0.01
	TN	—	—	0.371	0.429	0.453	—	1.314
	COD	—	—	5.848	5.528	10.198	10.041	11.432
径流量/ (10^8 m^3)		72.73	41.03	36.25	54.08	55.01	31.86	72.52
平 水 期	$\text{NH}_3\text{-N}$	0.113	0.207	0.159	0.173	0.263	0.161	0.131
	TP	0.054	0.034	0.041	0.025	0.026	0.021	0.042
	TN	0.530	0.415	0.431	—	—	—	—
	COD	—	—	7.798	11.052	11.043	11.261	11.040
径流量/ (10^8 m^3)		18.82	21.37	11.76	13.53	9.10	7.03	6.18
枯 水 期	$\text{NH}_3\text{-N}$	0.118	0.147	0.228	0.168	0.194	0.188	0.110
	TP	0.047	0.042	0.039	0.028	0.018	0.023	0.024
	TN	—	—	0.381	0.426	0.424	—	—
	COD	—	—	8.576	9.959	9.459	10.000	8.906

从表1可以看出,安康水文站年径流量年际分布不均,总径流量在2011年高达 $303.18 \times 10^8 \text{ m}^3$,但在2016年仅为 $81.16 \times 10^8 \text{ m}^3$,水文频率范围在3%~97%之间,涵盖了不同水文年。由表2,TN、TP、COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 污染物多年平均通量分别为6140.5 t、528.6 t、12.24万t和2792.4 t。点源多年平均污染负荷贡献指标从大到小依次为 $\text{COD} > \text{TN} > \text{NH}_3\text{-N} > \text{TP}$,非点源污染物TN、TP、COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 通量在2011—2017年的均值分别为:4260.1 t、351.8 t、8.67万t和1987.6 t,其贡献比在41.4%~86.7%之间。不同监测指标多年非点源负荷占比均值均超60%,除了TP占比64%外,其余三个指标高达69%,个别年份非点源污染负荷贡献占比能达到80%以上,尤其是2017年的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和COD两种污染物。

从近几年的陕西省生态环境厅水环境质量数据分析可发现汉江流域陕西段多数断面水质数据达到地表水II、III类标准,虽然点源污染负荷有逐年下降的趋势,但非点源污染的影响显著增大。

2.3 农业源污染物负荷分布特性解析

从以上分析可知非点源污染在汉江流域陕西段污染负荷中的占比比较重,而种植业、畜禽养殖、水产养殖及农村生活等污染物产生排放后,经降雨径流迁移转化后进入河道接纳水体造成水环境的污染,所以确定污染源来源对于水源区水环境质量改善有着举足轻重的作用。基于研究区域的实际情况,工业欠发达,重点关注来自农业源的污染,从农业用地、畜禽养殖和农村生活三方面进行考虑。本文将农业用地分为耕地、林地、草地和园地4种,畜禽养殖分为猪、牛、羊和家禽4种,不同污染源的输出系数利用文献综述法进行确定^[24](见表3)。利用等标污染物法和输出系数法计算出汉江流域陕西段各县不同污染物指标的农业源污染负荷,见表4。2017年汉江流域陕西段利用输出系数法计算出的TN、TP、COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 农业源负荷量分别为6.07万t、0.32万t、20.06万t和1.97万t,而对应的等标污染负荷法的结果分别为1214.7、320.4、133.8和393.1亿 m^3 。

表2 汉江安康水文站以上流域2011—2017年污染负荷分割结果
Tab.2 Results of pollution load segmentation of the basin above the Ankang Hydrological Station of Hanjiang River in 2011—2017

年份		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	均值
$L(t)$	NH ₃ -N	4 176	3 930.8	3 115	2 667.2	3 012.3	1 076.3	1 569.1	2 792.4
	TP	1 453.4	612.9	690.9	382.6	224	179.3	157.1	528.6
	TN	—	—	5 766.3	6 737.7	5 917.4	—	—	6 140.5
	COD	—	—	100 985	122 742	137 784	85 351	165 315.6	122 435.4
$L_d(t)$	NH ₃ -N	74	104.7	89.4	75.8	58.9	44.1	22.1	67
	TP	22.5	29.9	15.3	12.6	5.5	5.4	4.9	13.7
	TN	—	—	149.4	192.1	128.6	—	—	156.7
	COD	—	—	3 361.8	4 491.5	2 869.2	2 343.3	1 834.6	2 980.1
$L_p(t)$	NH ₃ -N	888.3	1 256.6	1 072.5	909.2	706.2	528.7	271.9	804.8
	TP	353.8	359	183.5	151.5	65.5	64.5	59.3	176.7
	TN	—	—	1 792.2	2 305.5	1 543.4	—	—	1 880.4
	COD	—	—	40 341.5	53 898.1	34 430.8	28 120	22 015.6	35 761.2
$L_n(t)$	NH ₃ -N	3 287.8	2 674.3	2 042.5	1 757.9	2 306.1	547.6	1 297.2	1 987.6
	TP	1 099.6	253.9	507.5	231	158.5	114.6	97.8	351.8
	TN	—	—	3 974.1	4 432.2	4 374.1	—	—	4 260.1
	COD	—	—	60 643.7	68 843.4	103 353.1	57 230.9	143 300	86 674.2
非点源 百分比/%	NH ₃ -N	78.7	68	65.6	65.9	76.6	50.9	82.7	69.8
	TP	75.7	41.4	73.5	60.4	70.8	63.9	62.2	64
	TN	—	—	68.9	65.8	73.9	—	—	69.5
	COD	—	—	60.1	56.1	75	67.1	86.7	69

表3 汉江流域陕西段不同污染源的输出系数

Tab.3 Export coefficients for different pollution sources in Shaanxi section of the Hanjiang River Basin

污染物指标	农业用地/(kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)				畜禽养殖/(kg·头 ⁻¹ ·a ⁻¹)				农村生活污染/ (kg·人 ⁻¹ ·a ⁻¹)
	耕地	林地	草地	园地	猪	牛	羊	家禽	
TN	30.94	3.27	1.58	14.3	0.74	10.21	0.4	0.04	2.14
TP	0.77	0.13	0.4	1.4	0.11	0.17	0.04	0.008	0.17
NH ₃ -N	3.21	0.34	0.68	1.5	1.19	3.79	0.41	0.004	0.9
COD	18	9.1	6.2	10	4.51	49.84	0.71	0.2	16.4

2.3.1 安康断面以上流域污染物入河系数分析

利用输出系数法计算出安康断面以上流域农业源非点源污染物 TN、TP、COD、NH₃-N 的负荷量分别为 3.79 万 t、0.20 万 t、12.2 万 t、1.25 万 t,在汉江流域陕西段农业源污染物中占比达 60%左右。将 2.2 节计算出的汉江流域安康断面以上非点源污染负荷通量与农业源污染物产生量相除,其结果就是污染物 TN、TP、COD、NH₃-N 的入河系数,分别为 0.11、0.18、0.71 和 0.16。

2.3.2 等标污染负荷量空间分布特征

借助 ArcGIS 软件,结合表 4 将等标污染负荷量添加到汉江流域陕西段的行政区划属性表中,并划分为 5 种污染等级,绘制了 2017 年各区县的 TN、TP、COD 和 NH₃-N 的等标污染负荷空间分布图,见图 4。等标污染负荷的空间分布具有一致性,具体体现在农业土地面积大、畜禽养殖业发达、农村人口众多的地区和县对应较大的等标污染负荷,反之亦然。其中各市等标污染负荷贡献率从大到小排序为:安康市(39.50%)>汉中市(39.49%)>商洛市(22.02%)。

表4 各区县不同污染物负荷估算统计表

Tab.4 Estimation table for different pollutants load estimation in each district and county

县	输出系数法/t				等标污染负荷法/(10 ⁹ m ³)			
	TN	TP	COD	NH ₃ -N	TN	TP	COD	NH ₃ -N
凤县	264.89	11.04	773.46	46.31	0.530	0.110	0.052	0.093
太白县	645.82	27.98	1 758.86	92.74	1.292	0.280	0.117	0.185
周至县	98.18	5.97	472.83	27.83	0.196	0.060	0.032	0.056
汉中	1 715.05	103.83	6 255.04	597.63	3.430	1.038	0.417	1.195
略阳县	590.10	32.34	1 951.16	150.58	1.180	0.323	0.130	0.301
宁强县	1 035.02	52.42	3 450.22	338.71	2.070	0.524	0.230	0.677
勉县	3 145.86	171.18	9 958.17	1 142.42	6.292	1.712	0.664	2.285
留坝县	863.56	40.10	2 729.31	177.55	1.727	0.401	0.182	0.355
南郑县	2 449.13	99.38	4 686.69	649.58	4.898	0.994	0.312	1.299
城固县	3 932.07	214.58	13 106.67	1 420.60	7.864	2.146	0.874	2.841
洋县	4 452.82	206.89	13 022.89	1 429.11	8.906	2.069	0.868	2.858
佛坪县	570.70	26.92	1 739.04	111.89	1.141	0.269	0.116	0.224
西乡县	3 652.06	188.41	10 964.91	1 329.89	7.304	1.884	0.731	2.660
镇巴县	1 339.82	68.66	4 645.19	451.45	2.680	0.687	0.310	0.903
安康	5 597.66	299.13	19 455.18	1 889.89	11.195	2.991	1.297	3.780
汉阴县	2 292.28	127.39	8 262.74	911.56	4.585	1.274	0.551	1.823
石泉县	1 831.77	89.62	5 987.22	607.68	3.664	0.896	0.399	1.215
宁陕县	1 583.77	70.62	4 723.20	273.08	3.168	0.706	0.315	0.546
紫阳县	2 282.21	138.93	8 351.60	877.27	4.564	1.389	0.557	1.755
岚皋县	1 403.16	92.01	5 081.74	496.98	2.806	0.920	0.339	0.994
平利县	2 027.77	125.43	7 620.51	792.46	4.056	1.254	0.508	1.585
镇坪县	56.74	3.91	213.10	24.68	0.113	0.039	0.014	0.049
旬阳县	4 590.26	225.85	16 468.76	1 603.87	9.181	2.258	1.098	3.208
白河县	1 309.43	78.51	5 307.88	479.35	2.619	0.785	0.354	0.959
柞水县	1 466.86	73.10	4 763.21	385.90	2.934	0.731	0.318	0.772
镇安县	2 383.84	102.62	6 638.23	479.74	4.768	1.026	0.443	0.959
山阳县	2 642.81	145.93	8 716.98	819.38	5.286	1.459	0.581	1.639
商南县	1 803.86	101.58	6 588.65	613.20	3.608	1.016	0.439	1.226
丹凤县	2 171.76	155.98	8 703.86	786.08	4.344	1.560	0.580	1.572
商县	2 323.13	112.32	7 483.15	574.04	4.646	1.123	0.499	1.148
洛南县	210.85	11.10	736.09	73.52	0.422	0.111	0.049	0.147
合计	60 733.25	3 203.71	200 616.55	19 654.97	121.47	32.04	13.38	39.31

由图4可知,各污染指标等标污染负荷的最大值均集中出现于汉中的城固县和洋县以及安康市的汉滨区和旬阳县,其贡献率均在7%左右。其原因是这几个区县的农业用地面积较大,农村养殖业较为发达,大规模的化肥施用和畜禽养殖都不同程度地加剧了非点源污染。虽然汉滨区农业用地的面

积小,但畜禽养殖及农村人口的数量大,因此对非点源污染的贡献率也较大。然后是贡献率在3.5%左右的勉县、山阳县、丹凤县、汉阴县、紫阳县和平利县,最小贡献率的地区出现在佛坪县、洛南县和镇坪县,占比不超过1%。

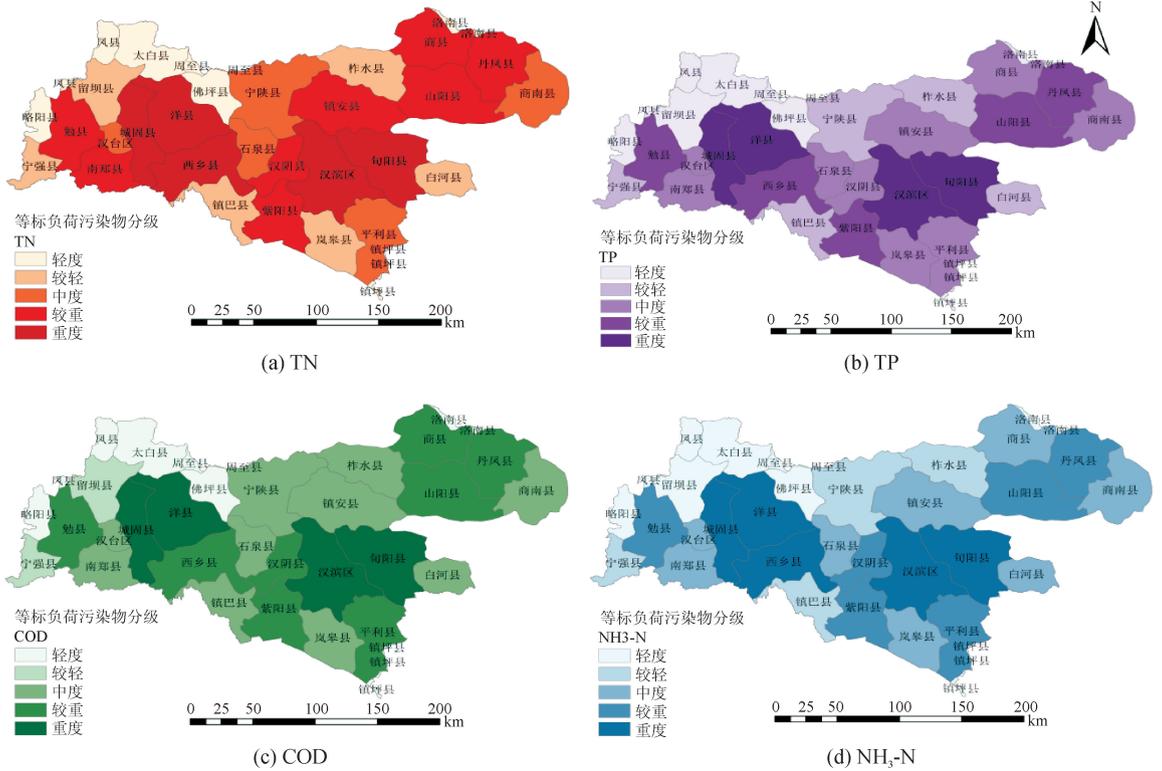


图4 各区县等标污染负荷分布图

Fig. 4 Distribution of equivalent standard pollution load in each district and county

2.3.3 污染源贡献率分布特征

统计各区县不同污染源的等标污染物负荷并计算其贡献率占比,并绘制以区县为基本单位的农业用地、农村生活及畜禽养殖的贡献率空间分布图,见图5和图6。

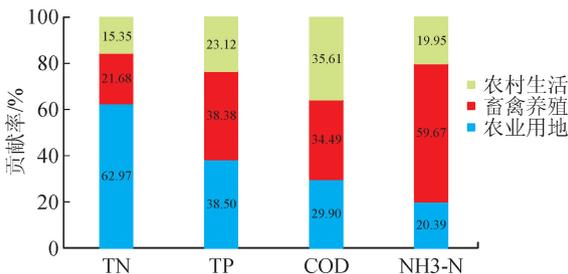


图5 不同污染源等标污染负荷贡献率占比图

Fig. 5 Contribution rate of equivalent standard pollution load of different pollution sources

根据统计结果可知农业非点源各污染指标等标污染负荷总量为 $206.19 \times 10^9 \text{ m}^3$,其中农业用地量为 $100.84 \times 10^9 \text{ m}^3$,畜禽养殖量为 $66.69 \times 10^9 \text{ m}^3$,农村生活量为 $38.66 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。与其他人的分析结果具有相似性^[25],在农业土地面积大、畜禽养殖业发达、农村人口众多的区县对应较大的等标污染负荷,反之也成立,空间分布有一定的一致性。由图5可知,农业用地对TN污染的贡献率达62.97%;畜

禽养殖对NH₃-N污染的贡献率超过50%以上,达到59.67%;TP污染的贡献率中畜禽养殖和农业用地相差不大,均大于38%;农村生活和畜禽养殖对COD污染贡献较大,两者贡献率之和超过70%。

为确定各县区农业非点源污染的主要来源,制定具有针对性的控制措施,分析图6(图例中46、42、40、38分别代表各指标三种来源贡献率中最大值的1/2)可发现TN等标污染负荷表现出明显的规律特征,均以农业用地为主;NH₃-N等标污染负荷贡献最大的为畜禽养殖;TP、COD等标污染负荷贡献率则分布不均,主要受制于各区县产业发展和用地情况。

受地形地貌等自然环境影响各县区不同污染源排放强度相差较大,综合分析流域内各县区的污染负荷发现农业用地和畜禽养殖贡献比较大。汉江流域陕西段内各区县的TN等标污染负荷具有明显的规律特征,即均以农业用地为主;NH₃-N等标污染负荷以畜禽养殖源为主;TP和COD的等标污染负荷贡献率分布则表现出一定的随机性。其中,太白县TN、TP、COD和NH₃-N四个污染负荷指标中农业用地的贡献率都最高,分别为92.16%、83.80%、80.83%和69.01%;农业用地对宁陕县TN、TP、COD负荷贡献率都较高,分别达到86.61%、74.16%和71.41%。畜禽养殖对汉阴县TN、TP、

COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 负荷污染贡献分别为 32.22%、48.99%、47.15% 和 69.00%，对丹凤县 TN、TP、COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 负荷污染贡献分别为 32.43%、55.55%、42.32% 和 66.48%。对流域内等标污染

负荷较大的城固县、洋县、汉滨区和旬阳县，TN 贡献率最大的均为农业用地；TP 中农业用地和畜禽养殖贡献率相当；COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 贡献率最大的均为畜禽养殖。

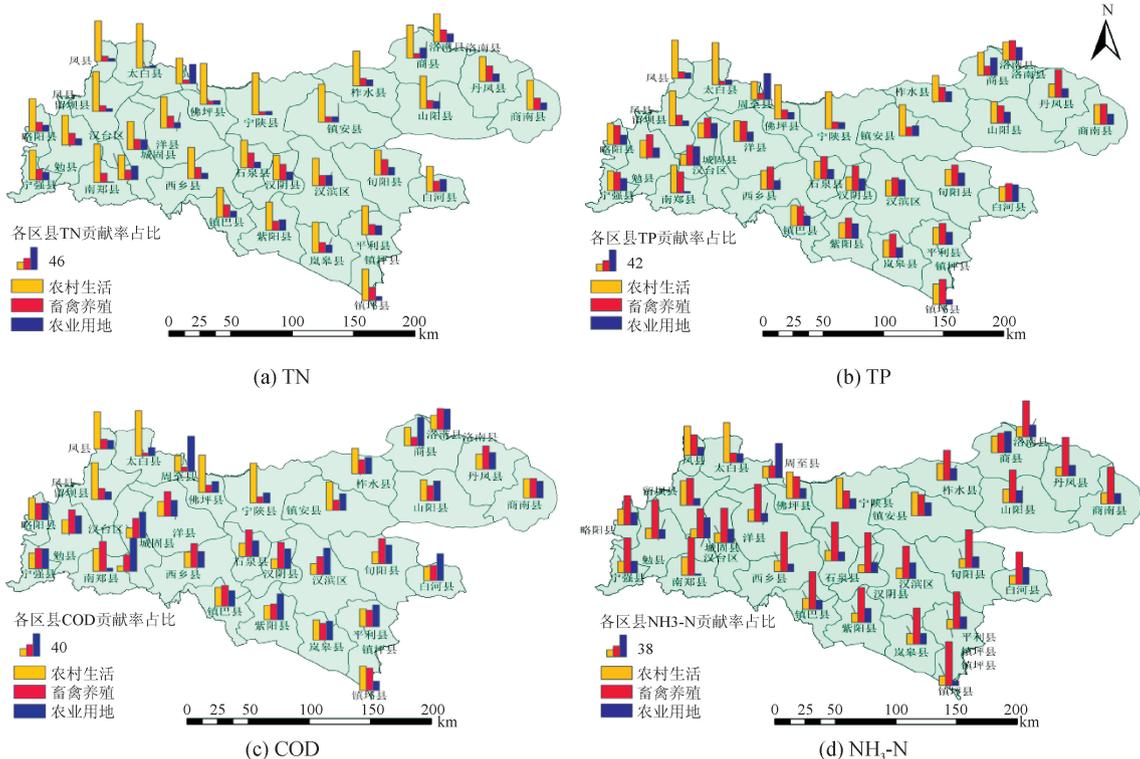


图6 各区县不同污染源等标污染负荷贡献率图

Fig. 6 Contribution rate of equivalent standard pollution load of different pollution sources in each district and county

鉴于此,汉江流域陕西段农业非点源污染治理方案应根据各县区污染源情况因地制宜。主要对农业用地污染进行管控的地区有:太白县、宁陕县、凤县、佛坪县、留坝县、镇安县等;畜禽养殖污染管控的地区则主要为:汉阴县、丹凤县、镇坪县、石泉县、旬阳县、南郑县等。

3 讨论

通过汉江流域陕西段 27 个气象站点 1971—2018 年的逐日降雨数据研究了流域降雨周期和降雨空间分布,发现降雨量有 27 a 的主周期,降雨量和降雨强度空间分布趋势不一致,但高值中心均位于镇巴县。从全国自然要素降雨入手发现,年平均降雨量变化较小,但是降雨强度呈上升趋势,极端降雨(暴雨和大雨)逐渐增加。在气候变化的大环境下,不同区域的水环境水生态问题越发突显,今年入汛以来,各河湖均出现历史极值,洪涝灾害对人民生活 and 国民经济的造成的危害很大,从水环境污染角度出发,分析汉江流域陕西段的非点源污染负荷通量及负荷

空间分布特性极具意义。降雨是污染的主要驱动自然要素,从 2011—2017 年安康站的水质水量数据入手分析,多年污染物平均通量贡献指标从大到小依次为 $\text{COD} > \text{TN} > \text{NH}_3\text{-N} > \text{TP}$,不同监测指标多年非点源通量占比均值均超 60%,除了 TP 占比 64% 外,其余三个指标高达 69%,个别年份非点源污染负荷贡献率能达到 80% 以上。随着对点源污染的有效治理,近年来点源污染负荷逐年减少,而非点源污染则是复杂水环境问题的重点所在。不同污染指标的入河系数影响因子众多,后续还得从多元化角度进行深入研究。从农业源污染物的来源来分析其空间分布,发现 TN 污染主要来源是农业用地,TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 污染主要来源是畜禽养殖,COD 污染主要来源是农村生活,未来汉江流域陕西段非点源污染治理方案应根据各县区污染源情况因地制宜。从非点源本身机理、模型化、关键源区识别及可行性优化措施等方面加大研究,助力水源区的水资源管理和水生态水环境保护,也为其他类似区域提供治理思路和技术支持。

4 结 论

在长江大保护和秦岭大保护的背景下,利用小波分析法、径流分割法、输出系数法及等标污染负荷法等方法从汉江流域陕西段自然要素降雨特性、非点源污染负荷通量计算及农业源污染物负荷空间分布特性三方面进行研究,得到如下结果。

1) 汉江流域陕西段降雨量有 27 a 的主周期,其空间分布呈现由北向南逐渐增大的趋势,而降雨强度呈现由南到北递减的趋势,两者高值中心均位于镇巴县,极易带来极端降雨事件、土壤侵蚀问题及其他水灾害问题。

2) 安康水文站年径流量年际分布不均,在 2011 年达到 $303.18 \times 10^8 \text{ m}^3$,而在 2016 年仅为 $81.16 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。汉江干流安康段以上非点源污染物 TN、TP、COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 通量在 2011—2017 年的均值分别为:4 261.1 t、351.8 t、8.67 万 t 和 1 987.6 t,各种水文年的非点源污染贡献比在 41.4%~86.7%之间,个别年份非点源污染贡献占比能达到 80%以上,尤其是 2017 年的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 COD 两种污染物。虽然从近几年的陕西省生态环境厅水环境质量数据分析可发现汉江流域陕西段多数断面水质数据达到地表水 II、III 类标准,但是非点源污染研究及治理依然不容忽视。

3) 2017 年汉江流域陕西段利用输出系数法计算出的 TN、TP、COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 农业源负荷量分别为 6.07 万 t、0.32 万 t、20.06 万 t 和 1.97 万 t,而对应的等标污染负荷法的结果分别为 1 214.7 亿 m^3 、320.4 亿 m^3 、133.8 亿 m^3 和 393.1 亿 m^3 。污染物 TN、TP、COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的入河系数分别为 0.11、0.18、0.71 和 0.16。

4) 从农业源污染物的来源来分析其空间分布,发现在农业土地面积大、畜禽养殖业发达、农村人口众多的区县对应的等标污染负荷较大。而 TN 污染主要来源是农业用地,TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 污染主要来源是畜禽养殖,COD 污染主要来源是农村生活,各区县不同污染源排放强度相差较大,流域内各县区的污染负荷中农业用地和畜禽养殖贡献比较大。汉江流域陕西段非点源污染治理方案应根据各区县污染源情况因地制宜,对太白县、宁陕县、凤县、留坝县、佛坪县、镇安县等县的农业用地污染进行管控,对汉阴县、丹凤县、镇坪县、石泉县、旬阳县、南郑县等县的畜禽养殖污染进行管控。可加大分类管理措施的实施及制定合理的土地利用结构,最大程度减轻源头污染。

参考文献:

[1] IPCC. Special report on global warming of 1.5 °C

(SR15) [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2018: 785.

- [2] PFAHL S, O'GORMAN P A, FISCHER E M. Understanding the regional pattern of projected future changes in extreme precipitation[J]. Nature Climate Change, 2017, 7(6): 423-427.
- [3] LIU Run, LIU Shawchen, RALPH J C, et al. Trends of extreme precipitation in eastern China and their possible causes[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2015, 32(8): 1027-1037.
- [4] 吴燕娟. 气候变化背景下我国极端降水的时空分布特征和未来预估[D]. 上海:上海师范大学,2016.
- WU Yanjuan. Temporal and spatial distribution characteristics and future prediction of extreme precipitation in China under the background of climate change [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2016.
- [5] 郝改瑞,李家科,李怀恩,等. 流域非点源污染模型及不确定分析方法研究进展[J]. 水力发电学报,2018,37(12):54-64.
- HAO Gairui, LI Jiake, LI Huaian, et al. Advances in research of watershed non-point source pollution models and uncertainty analysis methods [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(12): 54-64.
- [6] 中华人民共和国生态环境部,国家统计局,中华人民共和国农业农村部. 关于发布《第二次全国污染源普查公报》的公告[EB/OL]. [2020-6-8][2020-08-25]. http://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk01/202006/t20200610_783547.html.
- [7] 娄和震,吴习锦,郝芳华,等. 近三十年中国非点源污染研究现状与未来发展方向探讨[J]. 环境科学学报, 2020,40(5):1535-1549.
- LOU Hezhen, WU Xijin, HAO Fanghua, et al. Research progress of non-point source pollution in China over the past 30 years and discussion of the future direction development[J]. Acta Science Circumstantiae, 2020, 40(5): 1535-3549.
- [8] 陈灏,董前进. 基于 AWRI 指数的汉江上游流域水资源量评估[J]. 人民长江,2019,50(6):92-97,129.
- CHEN Hao, DONG Qianjin. Assessment of water resource in upper Hanjiang River basin based on AWRI [J]. Yangtze River, 2019, 50(6): 92-97, 129.
- [9] 王乐,杨文发,张录军,等. 北极海冰对长江流域主汛期降雨的影响[J]. 水科学进展,2019,30(5):623-631.
- WANG Le, YANG Wenfa, ZHANG Lujun, et al. Effect of Arctic sea ice on precipitation in the main flood season of the Yangtze River Basin[J]. Advances in Water Science, 2019, 30(5): 623-631.
- [10] 孙佳乐,王颖,辛晋峰. 汉江流域(陕西段)水生态承载力评估[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(3):80-86.

- SUN Jiale, WANG Ying, XIN Jinfeng. Water ecology carrying capacity evaluation on Shaanxi section of Hanjiang River basin[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(3): 80-86.
- [11] SUN Xiaole, HU Zhengyi, LI Meng, et al. Optimization of pollutant reduction system for controlling agricultural non-point-source pollution based on grey relational analysis combined with analytic hierarchy process[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 243: 370-380.
- [12] 邓娟. 陕西省不同生态类型区河流水质时空变化及其评价[D]. 北京:中国科学院大学, 2017.
- DENG Juan. Temporal and spatial variation and its evaluation of river water quality in different ecological type areas of Shaanxi Province[D]. Beijing: The University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [13] 陈婷, 夏军, 邹磊. 汉江上游流域水文循环过程对气候变化的响应[J]. 中国农村水利水电, 2019(9): 1-7.
- CHEN Ting, XIA Jun, ZOU Lei. The response of the upstream hydrological cycle process to climate change in the Upper Hanjiang River Basin[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(9): 1-7.
- [14] 汪成博, 李双双, 延军平, 等. 1970-2015年汉江流域多尺度极端降水时空变化特征[J]. 自然资源学报, 2019, 34(6): 1209-1222.
- WANG Chengbo, LI Shuangshuang, YAN Junping, et al. Spatiotemporal variation of extreme precipitation regimes in the Hanjiang River Basin during 1970-2015[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(6): 1209-1222.
- [15] 李丹, 郭生练, 洪兴骏, 等. 汉江流域1960~2014年降雨极值时空变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(9): 1448-1456.
- LI Dan, GUO Shenglian, HONG Xingjun, et al. Temporal and spatial variation of rainfall extremes in Han River Basin from 1960 to 2014[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(9): 1448-1456.
- [16] 张军, 李鹏, 唐润芒, 等. 陕西省丹汉江流域农业非点源污染区划[J]. 水土保持研究, 2017, 24(2): 325-329.
- ZHANG Jun, LI Peng, TANG Runmang, et al. Zoning of agricultural non-point source pollution in Dan-Han River Basin in Shaanxi Province[J]. Research on Soil and Water Conservation, 2017, 24(2): 325-329.
- [17] 杨柳. 陕西省泾惠渠灌区发展中的生态环境问题分析及调控研究[D]. 西安:西安理工大学, 2017.
- YANG Liu. Ecological environment problems analysis and regulation study in the development of Jinghui Canal irrigation distinct in Shaanxi province [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.
- [18] 李怀恩, 李家科. 流域非点源污染负荷定量方法研究与应用[M]. 北京:科学出版社, 2013.
- [19] JOHNES P J. Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: the export coefficient modelling approach[J]. Journal of Hydrology, 1996, 183(3/4): 323-349.
- [20] 夏凡, 胡圣, 龚治娟, 等. 不同水质评价方法的应用比较研究——以丹江口水库入库河流为例[J]. 人民长江, 2017, 48(17): 11-15, 24.
- XIA Fan, HU Sheng, GONG Zhijuan, et al. Comparative study on application of different water quality evaluation methods: a case study of inflow rivers in Danjiangkou reservoir area[J]. Yangtze River, 2017, 48(17): 11-15, 24.
- [21] XIE Hui, DONG Jianwei, SHEN Zhenyao, et al. Intra- and inter-event characteristics and controlling factors of agricultural nonpoint source pollution under different types of rainfall-runoff events [J]. Catena, 2019, 182: 104105.
- [22] LIU Ruimin, WANG Jiawei, SHI Jianhan, et al. Runoff characteristics and nutrient loss mechanism from plain farmland under simulated rainfall conditions [J]. Science of the Total Environment, 2014, 468-469: 1069-1077.
- [23] 张铁钢. 丹江中游小流域水—沙—养分输移过程研究[D]. 西安:西安理工大学, 2016.
- ZHANG Tiegang. Response of nutrient transports to runoff and sediment process in a small watershed of Danjiang watershed[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2016.
- [24] 孟令广, 徐森, 朱明远, 等. 南水北调中线水源区氮磷面源污染负荷计算[J]. 人民长江, 2017, 48(20): 10-15.
- MENG Lingguang, XU Sen, ZHU Mingyuan, et al. Calculation and analysis of N and P pollution load in water sources area of Middle Route Project of South-to-North Water Diversion [J]. Yangtze River, 2017, 48(20): 10-15.
- [25] 唐肖阳, 唐德善, 鲁佳慧, 等. 汉江流域农业面源污染的源解析[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(10): 2242-2251.
- TANG Xiaoyang, TANG Shande, LU Jiahui, et al. Source apportionment of agricultural nonpoint source pollution in the Hanjiang River Basin[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(10): 2242-2251.