

汾河水库上游流域土地利用类型变化特征 及其水环境效应研究

党晋华, 赵颖, 马晓勇, 闫函
(山西省环境科学研究院, 山西太原 030027)

摘要: 利用遥感和GIS技术,结合现场核查与生态调查,对汾河水库上游流域5268 km²区域各阶段生态系统构成及转化特征进行了研究。结合区域自然地理、水文及农业生产条件,分析了研究区各类生态系统变化对流域水环境的影响。研究表明:2000-2013年,汾河水库上游流域土地利用类型主要为草地、灌丛、森林,约占总面积的80%,但农地面积减少,森林、草地、湿地、城镇面积增加;草地是最稳定的土地利用类型,森林为最活跃的土地利用类型,湿地和森林在空间上呈现扩张的发展趋势;研究区森林、湿地生态系统面积增加,农田面积减少,对流域水环境均起到正效应,城镇面积的增加体现为负效应。汾河水库上游土地利用变化向有利于流域水环境的改善趋势发展。

关键词: 土地利用; 遥感; GIS; 水环境; 汾河水库

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2017)01-0062-07

Land use type change and the related water environment response in the upstream basin of Fenhe Reservoir

DANG Jinhua, ZHAO Ying, MA Xiaoyong, YAN Han

(Shanxi Provincial Academy of Environmental Sciences, Taiyuan 030027, China)

Abstract: Based on the remote sensing and GIS technologies, with the in-situ investigation and ecological survey, the ecological system components and the transformation characteristics at different stages in the 5268 km² area of upstream basin of Fenhe Reservoir were studied. According to the natural geography, hydrological and agricultural conditions, the effects of variations for different types of ecological system on water environment of the basin were analyzed. The results showed that: From 2000 to 2013, the main land use types at upstream of Fenhe reservoir were grassland, bushwood and forest, accounting for 80% of total area. Among them, the area of farmland was decreasing, while the area of forest, grassland, wetland and town was increasing; Grassland was the most stable land use type, and forest was the most active land use type. Forest and wetland were expanding spatially; The increase of forest and wetland area and the decrease of farmland area had positive effects on the basin environment. The increase of town area influenced the water environment negatively. In a word, the land use change in the upper reaches of Fenhe Reservoir improved the water environment.

Key words: land use; RS; GIS; water environment; Fenhe Reservoir

1 研究背景

生态环境是人类生存和发展的基本条件,是社会经济发展的基础。随着资源、环境和人口问题的

日益突出,土地利用/土地覆被(LUCC)是当前全球环境变化研究领域的核心研究内容之一^[1]。20世纪90年代以来,以RS、GIS和GPS为基础的“3S”技术能够实现大尺度地对大区域空间属性进行采集、

收稿日期:2016-09-13; 修回日期:2016-12-03

基金项目:山西省科技攻关项目(20150313001-2);环保部专项(STSN-05-04);国家自然科学基金项目(41601202)

作者简介:党晋华(1963-),女,山西太原人,硕士,教授级高级工程师,主要从事流域管理与生态健康评估的研究工作。

通讯作者:赵颖(1982-),女,山西太原人,博士,高级工程师,主要从事流域管理与生态健康评估的研究工作。

处理、分析、表达、管理等,且在土地利用/土地覆盖分类、生态环境质量动态监测和评价、宏观生态系统状况调查和评估等方面的应用已经取得了长足的进展^[2-3]。Ghaffari 等^[4]对伊朗 Zanjanrood 流域的研究结果指出,牧草地向雨养农业和裸地的转变将导致地表径流的增加。Nie 等^[5]在 San Pedro 流域研究表明,城市化是导致流域地表径流增加的主要原因。刘金巍等^[6]在遥感影像解译的基础上,从土地利用类型的结构、变化速率、变化方向及土地利用程度等方面分析了玛纳斯河流域土地利用的变化特征,并分析了影响土地利用变化的主要因素及不同因素之间的交互作用。曹芳芳等^[7]运用 ArcGIS 的水文、空间分析功能研究了新安江上游流域土地利用结构对水质的影响,结果指出,流域内耕地、水体、建筑用地起源作用,林地、草地起汇作用;枯水期和丰水期,对各指标影响最大的土地利用类型为耕地,在平水期,对 TN、TP、粪大肠菌群影响最大的土地利用类型分别为耕地、草地、林地。

汾河流域作为完整自然地理单元,土地利用覆盖格局变化直接制约着流域内的水文过程、水化学过程、生物过程等自然过程的发生发展。汾河水库作为太原市最大的地表饮用水水源地,供应着太原市 430 余万居民 40% 的生活用水,其上游流域土地利用类型构成及演变趋势,对流域水环境有着直接的影响。流域水环境保护在很大程度上取决于周围各生态单元的结构与功能^[8]。目前,对汾河水库上游流域生态环境保护方面的研究已有大量报道,主要集中在水土保持措施效益、流域产沙及水库淤积、水环境状况分析及治理以及土地利用类型及变化等方面^[9-12],而对流域土地利用类型与变迁及其对水环境的影响研究未见报道。

本研究利用遥感和 GIS 技术,对 2000-2013 年期间典型时段土地利用类型及其构成与转化特征进行分析研究,宏观分析了流域土地利用类型变化对流域水环境的影响。本研究对评估流域生态效益,加强生态环境保护,促进汾河水库上游流域可持续发展具有重要意义。

2 研究区概况

汾河水库位于汾河上游干流,坝址距源头雷鸣寺泉 122 km,控制流域面积 5 268 km²,占汾河流域总面积的 13.3%。流域涉及忻州市的宁武县、静乐县,吕梁市的岚县和太原市的娄烦县,占四县总面积的 77.2% (图 1)。

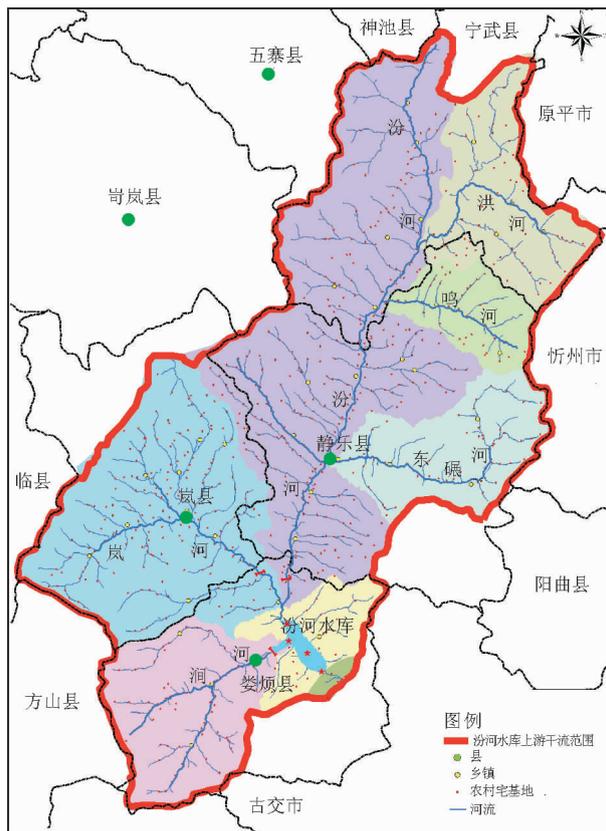


图 1 汾河水库上游流域水系图

流域内地形地貌复杂多样,由河谷、河谷阶地、丘陵及低、高、中山区组成,其中山区丘陵面积占 90% 以上,河谷小盆地及河谷阶地仅占 8% 左右。地势总体由河谷向东西两侧、由南向北地势升高。区内多年平均降水量为 489.3 mm,其中汛期降水量占全年的 78.8%,多年平均蒸发量 2 008 mm,年平均气温 6℃~13℃。

区内河流水系发达,主要支流有洪河、鸣河、东碾河、岚河、润河,河网密度 0.3 km/km²,平均纵坡 4% 左右。汾河水库上游干流从发源地到汾河水库入库口长 107 km,为山区性河流,具有明显的山区河流特点。河道曲折,河床狭窄,坡度陡,流速大,两岸主要为土石山区和黄土丘陵区,河床最宽处 1 km 左右,最窄处不足 50 m。上游干流河段,从头马营段到水库入口的 81.2 km 天然河道,是万家寨引黄工程的输水河道。

3 研究方法

3.1 数据收集

主要数据源为卫星影像数据,包括 2000 年、2005 年、2010 年、2013 年 4 期 30m 分辨率 LandsatTM 数据;2010 年 2.5 m 分辨率 ALOS 数据以及

2013年2.5 m分辨率SPOT数据,以及研究区1:50000地形图、行政矢量电子数据等资料。

收集了2007-2013年汾河水库上游3个控制断面(汾河东六度-河岔桥、涧河-一号桥和岚河-上静游)以及2000-2013年汾河水库4个例行点位(取水口、库中心、涧河入库附近;汾河入库附近)主要污染物监测数据(COD, NH_4^+-N 、TP、TN、石油类、阴离子活性剂),进行流域水环境现状分析。

3.2 数据处理

应用ENVI4.7遥感影像处理软件,在研究区1:50000地形图的基础上,选取双线性内插法,首先对2000、2005、2010、2013年4期研究区影像进行几何纠正,其次对影像进行镶嵌和裁切后应用于遥感解译。基于土地利用分类体系,结合研究区植被类型及其他土地利用类型的实际状况,将流域土地利用类型概括为森林(落叶阔叶林、常绿针叶林)、灌丛(落叶阔叶灌木林)、草地(草甸、草丛)、湿地(水库、河流)、农田(旱地、水浇地)、城镇(居住地、工业用地、交通用地、采矿场)、荒漠(裸岩)共7类^[13]。根据生态环境类型的影像特征及其地理分布特点,应用软件中的非监督分类模块,进行人机交互解译。解译完成后,在研究区选取300个检验点,采用目视解译与现场核查相结合的方法,对分类结果进行检验,经验证,4期遥感分类精度均值为79.23%,满足分类精度要求。

3.3 数据分析

3.3.1 土地利用转移矩阵计算 借助土地利用类型转移矩阵分析流域土地利用变化特征与各类型变化的方向。转移矩阵的意义在于它不仅反映研究期初、研究期末的土地利用类型结构,而且还可以反映研究时段内各类型的转移变化情况,便于了解研究期初各类型流失去向以及研究期末各类型的来源与构成。计算公式如下^[14]:

$$A_{ij} = a_{ij} \times 100 / \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (1)$$

式中: i 为研究初期土地利用类型; j 为研究末期土地利用类型; a_{ij} 为土地利用的面积; A_{ij} 为研究初期第*i*种土地利用类型转变为研究末期第*j*种土地利用类型的比例。

3.3.2 流域单一土地利用动态度和空间动态度的计算 单一土地利用类型动态度是对区域在一定的研究时段内某一种土地利用类型数量的变化情况进行分析的方法,计算公式如下^[15]:

$$K = \frac{K_j - K_i}{tK_i} \times 100 \% \quad (2)$$

式中: i 为研究初期土地利用类型; j 为研究末期土地利用类型; K 为研究时段内某一类土地类型的单一土地利用动态度; K_i 为研究初期阶段相应土地类型的面积, km^2 ; K_j 为研究期末相应土地利用类型的面积, km^2 ; t 为研究时段。

土地利用空间动态度表示测算土地利用动态变化的空间过程和强烈程度,计算公式如下:

$$K' = \frac{K'_j + K'_i}{tK_i} \times 100 \% \quad (3)$$

式中: i 为研究初期土地利用类型; j 为研究末期土地利用类型; K' 为研究时段内某一类土地类型的空间动态度; K'_i 为研究期间内某一类特定土地类型转化为其他土地类型的面积, km^2 ; K'_j 为研究期间内从其他土地类型转化为相应特定土地利用类型的面积, km^2 ; K_i 为研究初期阶段某一土地类型的面积, km^2 ; t 为研究时段。

3.3.3 流域综合土地利用动态度的计算 综合土地利用动态度是研究区内土地利用类型变化剧烈程度的综合表达,计算公式如下:

$$SK = \sum_{i=1}^n (\Delta K_{i-j}) / (t \sum_{i=1}^n K_i) \quad (4)$$

式中: i 为研究初期土地利用类型; j 为研究末期土地利用类型; SK 为综合土地利用动态度; K_i 为研究初期阶段某一特定土地类型的面积, km^2 ; ΔK_{i-j} 为监测开始至监测结束时段内该类土地利用类型转换为其它类土地利用类型面积总和, km^2 ; t 为研究时段。

4 结果与分析

4.1 研究区不同时期土地利用类型

研究区各年度土地利用类型构成如表1。

研究区土地利用类型以草地、灌丛、森林为主,约占总面积的80%。其中,草地面积约占总面积的50%,森林及灌丛面积约占30%,以自然生态系统为主。2000-2013年,森林、湿地生态系统所占比例显著增加,灌丛所占比例显著降低。草地、城镇生态系统面积增加,农田生态系统面积减少。其中森林比例由7.00%增加到15.83%;湿地比例由0.35%增加到0.73%;草地比例由47.82%增加到50.84%;城镇比例由0.91%增加到1.35%。灌丛比例由24.23%减少到14.27%;农田比例由19.70%减少到17.02%。

4.2 研究区土地利用类型动态变化

计算 2000 - 2013 年土地利用变化比例,计算结果见

4.2.1 研究区土地利用变化特征 根据公式(1) 表 2。

表 1 汾河流域土地利用类型面积

土地利用类型	2000 年		2005 年		2010 年		2013 年	
	面积/km ²	比例/%						
森林	368.50	7.00	607.83	11.54	810.61	15.39	833.82	15.83
灌丛	1276.54	24.23	1192.20	22.63	701.93	13.32	751.95	14.27
草地	2519.17	47.82	2482.74	47.13	2754.80	52.29	2678.23	50.84
湿地	18.28	0.35	27.17	0.52	35.44	0.67	38.53	0.73
农田	1037.71	19.70	912.61	17.32	911.50	17.30	896.80	17.02
城镇	47.79	0.91	45.45	0.86	53.72	1.02	68.67	1.35
合计	5268	100	5268	100	5268	100	5268	100

表 2 汾河流域 2000 - 2013 年土地利用类型转移矩阵

km²

研究起始时间	土地利用类型	2013 年						
		森林	灌丛	草地	湿地	农田	城镇	合计
2000 年	森林	365.58	1.15	1.75	0	0	0.01	368.49
	灌丛	324.54	466.99	482.39	0.12	2.36	0.14	1276.54
	草地	67.26	253.85	2131.39	3.48	46.07	17.13	2519.18
	湿地	0	0.09	0.38	16.98	0.76	0.06	18.27
	农田	76.27	28.85	64.36	17.33	839.56	11.35	1037.72
	城镇	0.07	0.59	2.26	0.64	3.3	40.93	47.79
	合计	833.72	751.52	2682.53	38.55	892.05	69.62	5268

从表 2 可以看出:研究时段内,森林、草地、湿地、城镇在增加,其他 2 个土地利用类型的面积不同程度地在减少。森林和草地面积增加主要由灌丛、农田转变而来。湿地和城镇面积增加主要由草地、农田转变而来。这 6 种土地利用类型各自流失的面积由大到小的顺序依次为灌丛 > 草地 > 农田 > 城镇 > 森林 > 湿地,6 种土地利用类型各自流入的面积由大到小的顺序依次为草地 > 森林 > 灌丛 > 农田 > 城镇 > 湿地。草地的转入面积为 551.14 km²,转出面积为 387.79 km²;森林的转入面积为 468.14 km²,转出面积为 2.91 km²;城镇的转入面积为 28.69 km²,转出面积为 6.86 km²;湿地的转入面积为 21.57 km²,转出面积为 1.67 km²。灌丛的转入面积为 284.53 km²,转出面积为 809.55 km²;农田的转入面积为 52.49 km²,转出面积为 198.16 km²。因此,林地、草地、湿地和城镇面积总体在增加,而灌丛和农田面积总体在减少。

4.2.2 研究区土地利用动态度 根据式(2)、(3)和(4)计算得到汾河流域单一土地利用类型动态

度、空间动态度和综合动态度值(表 3)。

表 3 汾河流域 2000 - 2013 年土地利用动态度 %

土地利用类型	单一动态度 K	空间动态度 K'	综合土地利用动态度 SK
森林	9.71	9.83	2.05
灌丛	-3.16	6.59	
草地	0.50	2.87	
湿地	8.54	9.78	
农田	-1.08	1.86	
城镇	3.51	5.72	

依据表 3 可知,汾河水库上游流域 2000 - 2013 年,土地利用类型中草地的单一动态度值最小,平均每年的转移率为 0.5%。说明在研究时段内其他类型向草地的转移量很小,草地是最稳定的土地利用类型。而最活跃的土地利用类型为森林,平均年变化率为 9.71%。

汾河水库上游流域 2000 - 2013 年的土地利用类型变化中,森林的空间动态度值最大,湿地次之,

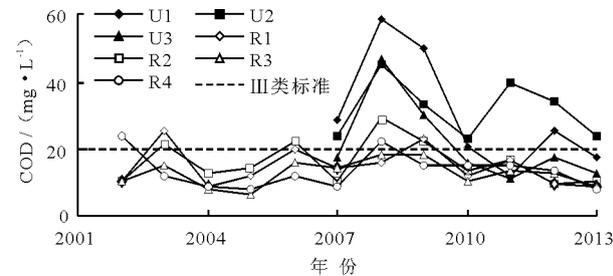
表明在研究时段内,其他土地类型向湿地和森林的转移程度剧烈,幅度很大,空间上呈现扩张的发展趋势。

4.3 汾河水库上游流域水环境状况分析

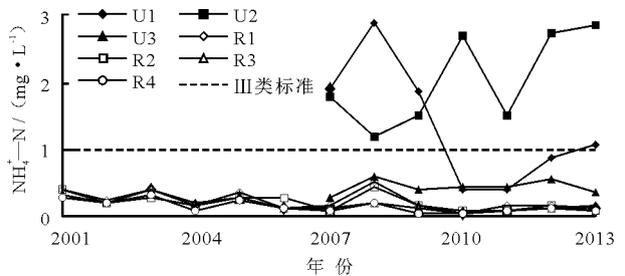
汾河水库上游流域3个人库断面(涧河、岚河、汾河东六渡桥)及汾河水库4个监测断面(汾河进水区、涧河进水区、库中心区、水库出水区)主要污染因子COD、 NH_4^+-N 、TP、TN、石油类、阴离子表面活性剂(LAS)年际变化如图2所示。

由图2可知,对照《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)Ⅲ类标准,3条入库河流水质情况

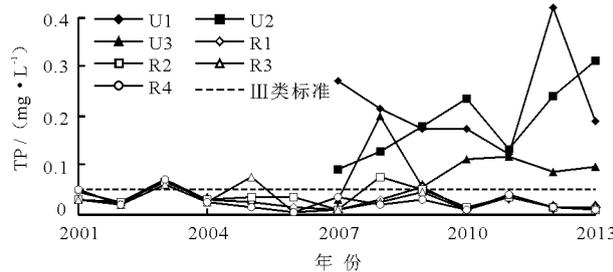
为:六渡桥从2010年以来,COD、 NH_3-N 、LAS实现稳定达标,TP、TN超标,2012年以来石油类出现超标现象;岚河COD、 NH_3-N 、TP、TN、石油类历年监测数据全部超标,2013年LAS超标;涧河COD、TP、TN、石油类基本全部超标。总体上看,3个人库河流断面水质不容乐观,不能稳定达Ⅲ类水质标准。特别是与生活污染有关的TN、TP、LAS及石油类,污染还有上升趋势,其中以岚河污染最为严重。汾河水库水质情况为:除TN外,其余指标均可满足标准,且呈现逐年下降的趋势。此外,所有指标监测数据均低于上游3个人库断面相应指标的监测值。



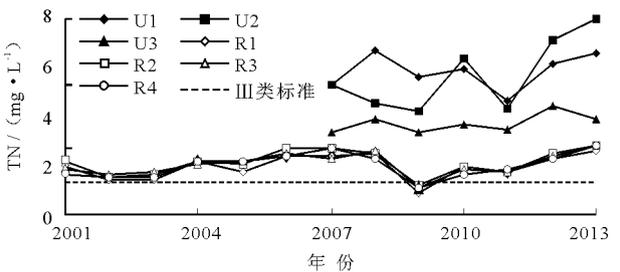
(a) 汾河水库及上游流域COD浓度年际变化



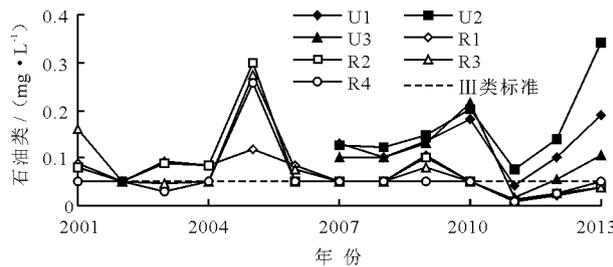
(b) 汾河水库及上游流域 NH_4^+-N 浓度年际变化



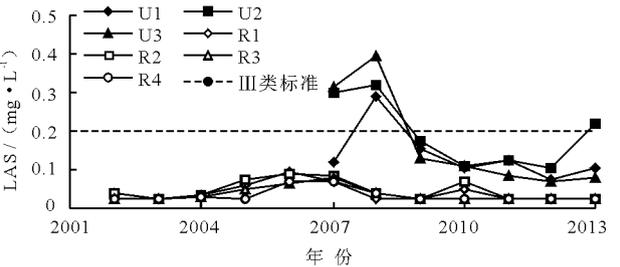
(c) 汾河水库及上游流域TP浓度年际变化



(d) 汾河水库及上游流域TN浓度年际变化



(e) 汾河水库及上游流域石油类浓度年际变化



(f) 汾河水库及上游流域阴离子表面活性剂(LAS)浓度年际变化

U1: 涧河;U2: 岚河;U3: 汾河东六渡桥;R1: 汾河进水区;R2: 涧河进水区;R3: 水库中心区;R4: 水库出水区

图2 汾河水库及上游流域各污染物浓度年际变化

5 讨论

5.1 土地利用变化的驱动因素分析

5.1.1 国家生态修复政策 政策制度因素对土地利用变化有着强制性的影响^[16],西部开发“生态退耕”政策对区域土地覆盖状况的改善产生了积极的影响。1988年以来,在汾河水库上游水土保持总体

规划指导下,按照因地制宜、综合治理原则,以小流域为单元,以多沙区为重点,对汾河水库上游流域进行了大规模的水土流失治理,至今共完成治理面积约2000 km²。主要措施有淤地坝、水平梯田建设,退耕还林、植树种草等。1990-2010年期间,以林、草为主的植被恢复工程,特别是2000年以来的退耕还林还草工程的实施,使林地草地用地面积显著增

加,区域覆盖状况明显改善,在一定程度上,使汾河上游地区植被覆盖度和水源涵养功能都得到了提高^[17]。此外,2003年11月引黄工程试运行,实现向太原安全稳定供水。引黄水经管道至汾河上游头马营出水,经过81.2km天然河道进入汾河水库。引水量由2004年 $0.6825 \times 10^8 \text{ m}^3$ 到2013年 $2.4385 \times 10^8 \text{ m}^3$,加之上游源头区水源涵养功能的不断加强,流域水面、湿地生态功能有了很大恢复。

因此,2000-2013年,森林比例由7.00%增加到15.83%;湿地比例由0.35%增加到0.73%;草地比例由47.82%增加到50.84%;农田比例由19.70%减少到17.02%。2000年以来,农田面积逐年减少,小流域治理中的农田水利设施不断建设完善,使得汾河水库农业面源污染产生量减少,并且在淤地坝及林、草作用下,化肥、农药及农村生活排污、畜禽养殖等分散排放的污染物得到有效控制。

5.1.2 快速城镇化与社会经济高速发展 城镇化是指农村人口不断向城镇聚集的过程,其本质特征是农村人口的空间转换、非农产业向城镇聚集、农业劳动力向非农业劳动力转移^[18]。城镇化是一个国家经济结构、社会结构和生产方式、生活方式的根本性转变^[19]。社会经济的发展和国家政策的引导是产业结构发生转变的原因,产业结构转变导致居民就业岗位的改变和土地利用方式的变化。近年来,山西省社会经济持续快速发展,城市化水平快速提升,以位于汾河水库流域的娄烦县为例,GDP由2009年的 6.23×10^8 元增长到2013年的 17.1×10^8 元,增长了近2倍;工业增加值由2009年的 1.6×10^8 元增长到2013年的 8.3×10^8 元。

因此,随着城镇化和社会经济的发展,汾河流域内土地利用方式也发生了转变,表现为城镇建设用地的扩张,2000-2013年汾河水库上游流域城镇面积增加了50%,这些新增的城镇面积主要分布在岚河、涧河流域河谷地带,主要来源于草地和农田。

5.2 土地利用变化对水环境的影响分析

5.2.1 城镇面积增加导致的水质污染 居民点及工矿用地面积增加,会使工业废水和城镇生活污水的排放量不断增加,这些污水虽大部分经过处理,但仍有一部分直接排入河道,造成高强度的点源污染,且通过流域地表水-地下水的多次相互循环转化进而污染整个水系^[20]。汾河水库上游流域目前存在为数不多的企业,多数沿河谷布局。其中煤矿排水占流域工业废水总排放量的94%以上,排水以矿井水为主,水质SS、硫酸根离子含量较高,若未经处理

直接排放,将对河流水质产生较大影响。此外,城镇生活污水处理系统严重滞后于当地经济社会发展和水环境保护的要求,污水收集管网普遍不完善,流域内沿河主要乡镇缺乏相应的污水管网和污水处理设施,未经处理的生活污水直接排放,严重影响河流水质。其COD、氨氮排放量分别占到流域总排放量的69%和56%,污染贡献大,为流域主要的污染源。因此,由于城镇面积增加导致工业废水和城镇生活污水排放量的增加是河流水质COD、氨氮超标的主要原因。

5.2.2 农田面积减少 随着年份的增长,水质污染状况指标呈现持续恶化的趋势,主要原因是由于随着年份的增长,流域城镇村工矿建设用地的所占比例不断扩大,而流域内耕地、有林地、牧草地、湿地等地类不断减少,导致了水环境状况的持续恶化。

6 结 论

(1)汾河水库上游流域土地利用类型以草地、灌丛、森林等自然生态系统为主,约占总面积的80%。2000-2013年,土地利用变化较为显著。森林、草地、湿地、城镇面积增加,农田面积减少。其中,森林生态系统增加最为明显,湿地次之。农田面积减少了13.58%。

(2)森林和草地面积增加主要由灌丛、农田转变而来。湿地和城镇面积增加主要由农田、草地转变而来。农田和灌丛面积减少,转为森林、灌丛、草地、湿地、城镇。

(3)草地是汾河流域最稳定的土地利用类型,而森林是最活跃的土地利用类型;湿地和森林这两种土地利用类型在空间上呈现扩张的发展趋势。

(4)森林、湿地生态系统面积增加,农田面积减少,对流域水环境均起了正效应,城镇面积的增加体现为负效应。但总体上看,汾河水库上游土地利用变化向有利于流域水环境的改善趋势发展。

参考文献:

- [1] Foley J A, Defries R, Asner G P, et al. Global consequences of land use [J]. Science, 2005, 309 (5734): 570-574.
- [2] 依热下提·卡米力,李建柱,冯平.潘家口水库流域土地利用变化的水文响应分析[J].水资源与水工程学报,2015,26(1):47-51.
- [3] Li T H, Li W K, Qian Z H. Variations in ecosystem service value in response to land use changes in Shenzhen [J]. Ecological economics, 2010,69(7):1427-1435.

- [4] Ghaffari G, Keesstra S, Ghodousi J, et al. SWAT – simulated hydrological impact of land – use change in the Zanjanrood Basin, Northwest Iran [J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(7):892 – 903.
- [5] Nie W M, Yuan Y P, Kepner W, et al. Assessing impacts of landuse and landcover changes on hydrology for the upper San Pedro watershed [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 407(1/2/3/4):105 – 114.
- [6] 刘金巍, 靳甜甜, 刘国华, 等. 新疆玛纳斯河流域 2000 – 2010 年土地利用/覆盖变化及影响因素[J]. *生态学报*, 2014, 34(12):3211 – 3223.
- [7] 曹芳芳, 李雪, 王东, 等. 新安江流域土地利用结构对水质的影响[J]. *环境科学*, 2013, 34(7):2582 – 2587.
- [8] Cowling R M, Ego B, Knight A T, et al. An operational model for mainstreaming ecosystem services for implementation [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(28):9483 – 9488.
- [9] 王学敏, 聂兴山. 汾河水库上游水土保持综合治理效益分析——以静乐县二期治汾为例[J]. *山西农业大学学报(社会科学版)*, 2007, 6(3):237 – 240.
- [10] 兰跃东. 汾河水库上游水土保持治理措施减沙效益分析[J]. *山西水土保持科技*, 2012, 9(3):7 – 9.
- [11] 王晓宇. 汾河水库及其上游水环境状况分析及治理[J]. *水资源保护*, 2010, 26(4):89 – 92.
- [12] 马晓勇, 张国信, 党晋华, 等. 汾河上游土地利用类型动态变化研究[J]. *山西大学学报(自然科学版)*, 2013, 36(2):308 – 312.
- [13] 马子清. 山西植被[M]. 北京:中国科学技术出版社, 2001:48 – 138.
- [14] 张祎, 李玉凤, 高鸿, 等. 基于土地转移矩阵的生态服务功能研究——以南京市仙林新市区为例[J]. *生态与农村环境学报*, 2014, 30(6):800 – 805.
- [15] 刘纪元, 布和敖斯尔. 中国土地利用变化现代过程时空特征的研究: 基于卫星遥感数据[J]. *第四纪研究*, 2000, 20(3):229 – 239.
- [16] Wood D, Lenne J M. Revised wisdom in agriculture land use policy: 10 years on from Rio [J]. *Land Use Policy*, 2005, 22:75 – 93.
- [17] 徐晓莉, 秦柞栋. 汾河流域景观格局及其动态变化研究[C]//中国地理学会 2013 年(华北地区)学术年会论文集, 2013:786 – 794.
- [18] 曹银贵, 周伟, 乔陆印, 等. 青海省 2000 – 2008 年间城镇建设用地变化及驱动力分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(1):40 – 46.
- [19] 陆大道. 我国的城镇化进程与扩张[J]. *城市规划学报*, 2007, 17(4):47 – 52.
- [20] 孟宝, 张勃, 张华. 黑河中游张掖市土地利用/覆盖变化的水文水资源效应分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2006, 20(3):94 – 99.

(上接第 61 页)

- [6] 李志, 于孟文, 张丽玲, 等. 西辽河平原地下水资源及其环境问题调查评价[M]. 北京:地质出版社, 2009.
- [7] 陈志云, 林岚, 王晓昕, 等. 西辽河平原区地下水水位动态与水资源可持续发展[J]. *水利经济*, 2012, 30(2):57 – 59.
- [8] 徐凯, 陆垂裕, 汪林. 西辽河流域平原区地下水动态补给研究[J]. *水利水电技术*, 2013, 44(6):22 – 25.
- [9] 顾世祥, 李远华, 何大明, 等. 以 MIKE BASIN 实现流域水资源三次供需平衡[J]. *水资源与水工程学报*, 2007, 18(1):5 – 10.
- [10] 陈刚, 张兴奇, 李满春. MIKE BASIN 支持下的流域水文建模与水资源管理分析——以西藏达孜县为例[J]. *地球信息科学*, 2008, 10(2):230 – 236.
- [11] 王蕾, 肖长来, 梁秀娟, 等. MIKE BASIN 模型在吉林市水资源配置方面的应用[J]. *中国农村水利水电*, 2014(1):128 – 131.
- [12] 王浩, 秦大庸, 王建华, 等. 黄淮海流域水资源合理配置[M]. 北京:科学出版社, 2003. 10:21 – 159.
- [13] 王浩, 王建华, 秦大庸, 等. 基于二元水循环模式的水资源评价理论方法[J]. *水利学报*, 2006, 37(12):1496 – 1502.
- [14] 中水东北勘测设计研究有限责任公司. 西辽河平原风沙河流沙化治理关键技术研究[R]. 长春:2016:109 – 136.
- [15] 通辽市水文局. 通辽市水资源公报[R]. 通辽:2013, 2.