

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.12

第40卷 第12期

目次(卷终)

研究报告

- 京津冀秋冬季 PM_{2.5} 污染概况和预报结果评估 朱媛媛, 高愈霄, 刘冰, 王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 汪巍, 丁俊男, 李健军, 段小丽 (5191)
- 2016 ~ 2017 年采暖期华北平原东部 PM_{2.5} 组分特征及来源解析 张逸琴, 王杰, 高健, 徐仲均, 车飞, 马彤, 杨艳, 刘素, 闫璐璐 (5202)
- 霾不同发展阶段下污染气体和水溶性离子变化特征分析 王振彬, 刘安康, 卢文, 杨晓旻, 王红磊, 陈魁, 夏丽 (5213)
- 上海郊区家庭妇女 PM_{2.5} 重金属组分暴露水平、来源与健康风险 罗燃燃, 戴海夏, 张蕴晖, 乔利平, 马英歌, 周敏, 夏斌, 朱清扬, 赵迎亚, 黄成 (5224)
- 固定污染源可凝结颗粒物测量方法 蒋靖坤, 邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 郝吉明 (5234)
- 家具企业挥发性有机物排放特征及其环境影响 张嘉妮, 曾春玲, 刘锐源, 姚懿娟, 柯云婷, 范丽雅, 叶代启 (5240)
- 抗生素企业 VOCs 排放清单及影响范围模拟 竹涛, 吕怡蓉, 边文璟, 牛文凤, 袁前程, 段二红, 于洋, 林军 (5250)
- 新乡市机动车排放对道路灰尘中重金属与多环芳烃污染的影响 李琦路, 吴锦涛, 张颖, 孙玉静, 乔泓钦, 张子伟, 裴梦园, 张孟琼, 任明浩 (5258)
- 成都市道路积尘中全氟化合物的污染特征及暴露风险评估 方淑红, 朱和祥, 叶芝祥, 印红玲, 孙静 (5265)
- 祁连山北坡中段降水稳定同位素特征及水汽来源分析 张百娟, 李宗省, 王昱, 李永格, 吕越敏, 袁瑞丰, 桂娟 (5272)
- 长江南京段水源水中抗生素的赋存特征与风险评估 封梦娟, 张芹, 宋宁慧, 卜元卿, 杨正标, 刘艳华, 郭瑞昕, 陈建秋, 张圣虎 (5286)
- 夏秋季混凝剂对复合锰氧化膜去除地表水中氨氮和锰的影响 程丽杰, 黄廷林, 程亚, 张莎莎, 阮昭意, 卢磊 (5294)
- 浙江省 H 市供水系统消毒副产物及其健康风险评价 刘俊萍, 于建全, 李青松, 马晓雁, 杨玉龙, 贾佳 (5302)
- 三峡库区城镇化背景下河流 DOM 的吸收及荧光光谱特征 陈昭宇, 李思悦 (5309)
- 川西高原河流水体 CDOM 的光化学降解特性 刘堰杨, 孙辉, 刘琛, 王小沁 (5318)
- 三峡库区典型紫色土小流域径流及氮磷流失特征 曹瑞霞, 刘京, 邓开开, 先宇, 王伟, 方芳, 欧阳文娟, 郭劲松 (5330)
- 九龙江流域河流磷输出对土地利用模式及水文状况的响应 黄亚玲, 唐莉, 黄金良, 肖才荣 (5340)
- 不同尺度土地利用方式对鄱阳湖湿地水质的影响 方娜, 刘玲玲, 游清徽, 田娜, 吴燕平, 阳文静 (5348)
- 太湖草藻型湖区磷赋存特征及其环境意义 耿雪, 文帅龙, 孙培荣, 徐楚天, 李大鹏, 黄勇 (5358)
- 太湖竺山湾沉积物碳氮磷分布特征与污染评价 方家琪, 祁闯, 张新厚, 韩睿明, 黄和笑, 王卓森, 王国祥 (5367)
- 降雨强度对洱海流域凤羽河氮磷排放的影响 李晓虹, 雷秋良, 周脚根, 张亦涛, 李影, 胡万里, 武淑霞, 翟丽梅, 王洪媛, 刘宏斌 (5375)
- 外源 Ca²⁺ 和 K⁺ 作用下河口区碱蓬水质净化效果和耐盐碱提高机制 吴丹, 孙萍, 陈广琳, 陈友媛, 彭昌盛 (5384)
- 泽泻 (*Alisma orientale*) 对全氟化合物的吸收和传输特征-浓度的影响 王团团, 李贝贝, 王赛, 华佩, 陈军, 应光国 (5394)
- 复合人工湿地中反硝化除磷作用的发生及其稳定性 刘冰, 郑煜铭, 李清飞, 赵承美, 魏巍, 张凯 (5401)
- 铅、镉和铜改性沸石添加控制底泥磷释放的对比 刘婷, 赵钰颖, 林建伟, 詹艳慧, 秦琴 (5411)
- 生物炭结构性质对氨氮的吸附特性影响 陈梅, 王芳, 张德俐, 易维明 (5421)
- 溶解氧对悬浮与附着生长系统短程硝化反应的影响机制 王嗣禹, 刘灵婕, 王芬, 季民 (5430)
- 间歇恒定/梯度曝气对 SNAD 工艺启动的影响 李冬, 刘志成, 徐贵达, 李帅, 张杰 (5438)
- 共基质模式下铁盐脱氮反应器的运行性能及微生物学特征 王茹, 刘梦瑜, 刘冰茵, 赵治国, 袁林江 (5446)
- 阶梯曝气对城市污水好氧颗粒污泥系统的影响 李冬, 魏子清, 劳会妹, 李帅, 张杰 (5456)
- 酵母菌降解胞外聚合物提升剩余活性污泥的脱水性能 俞心怡, 向金豪, 刘英, 龚天翼, 张彬辉, 吕文洲 (5465)
- 基于 GEE 的 1998 ~ 2018 年京津冀土地利用变化对生态系统服务价值的影响 娄佩卿, 付波霖, 林星辰, 闭璐, 马瑞雪, 唐廷元 (5473)
- 基于 MDS 与 TOPSIS 模型的滨海滩涂围垦区土壤质量评价 解雪峰, 濮励杰, 朱明, 吴涛, 许艳 (5484)
- 淹水增加对闽江河口淡水潮汐湿地孔隙水地球化学特征及 CO₂ 和 CH₄ 排放通量的影响 李敬, 黄佳芳, 罗敏, 刘育秀, 谭季, 朱爱菊, 王声钰, 仝川 (5493)
- 养殖塘 CH₄ 排放特征及其影响因素 王娇, 肖薇, 张秀芳, 张弥, 张文庆, 刘强, 陈争, 董保华, 李旭辉 (5503)
- 施肥对高梁地土壤呼吸及其温度敏感性的影响 严俊霞, 张媛, 焦晓燕 (5515)
- 高硒高镉区土地安全区划方法 王锐, 侯宛苓, 李雨潼, 余涛, 陈娟 (5524)
- 不同配比复合材料对农田镉污染土壤的修复效果 陈树兰, 许晨阳, 耿增超, 王强, 祝乐, 龚园, 拓卫卫 (5531)
- 水铝钙石对不同镉污染农田重金属的钝化效果及机制 吴秋梅, 刘刚, 王慧峰, 胡文友, 黄标 (5540)
- 狮子山矿区不同土地利用类型对土壤微生物群落多样性的影响 黄健, 朱旭炎, 陆金, 孙雨, 赵兴青 (5550)
- 林地转型耕地对东北丘陵区白浆土 *cbbL* 细菌群落丰度和结构的影响 王蕊, 吴宪, 李刚, 修伟明, 王丽丽, 张贵龙 (5561)
- 粤港澳大湾区场地污染特征、治理修复与环境管理研究专辑
- 粤港澳大湾区污染场地土壤风险管控制度体系建设与思考 常春英, 董敏刚, 邓一荣, 肖荣波, 刘丽丽 (5570)
- 粤港澳大湾区土壤污染问题计量及可视化分析 张宁, 张盛, 杨海超, 张建通 (5581)
- 城市生活垃圾填埋场的物质存量特征及其环境影响: 以粤港澳大湾区为例 马仕君, 周传斌, 杨光, 赵志岚, 刘懿颀 (5593)
- 粤港澳大湾区丘陵区带某电镀场地重金属污染特征与迁移规律分析 侯文隽, 龚星, 詹泽波, 刘锋, 黄子航, 杨立宏, 林晓琛 (5604)
- 粤港澳大湾区典型化工场地苯系物污染特征及迁移规律 邓一荣, 陆海建, 董敏刚, 程洲, 庄长伟, 肖荣波, 钟音, 彭平安 (5615)
- 针铁矿-富里酸复合材料对铅镉污染土壤的钝化修复性能 刘千钧, 李想, 周阳媚, 唐杰鹏, 林亲铁, 姚琨 (5623)
- 广东大宝山矿区土壤植物体系重金属迁移过程及风险评价 陈洁宜, 刘广波, 崔金立, 肖唐付 (5629)
- Hydrus-1D 模型在推导基于保护地下水的土壤风险控制值中的应用 林挺, 罗飞, 朱艳, 杨坤, 郝秀平 (5640)
- 《环境科学》第 40 卷(2019 年)总目录 (5649)
- 《环境科学》征订启事(5233) 《环境科学》征稿简则(5285) 信息(5357, 5420, 5429)

基于 GEE 的 1998 ~ 2018 年京津冀土地利用变化对生态系统服务价值的影响

娄佩卿, 付波霖*, 林星辰, 闭璐, 马瑞雪, 唐廷元

(桂林理工大学测绘地理信息学院, 广西空间信息与测绘重点实验室, 桂林 541006)

摘要: 在京津冀地区可持续发展评估研究中, 对生态系统服务价值进行动态估算具有重要意义. 本文以京津冀地区为研究区, 基于谷歌地球引擎 (GEE) 云平台采用分类决策树 (CART) 分类算法对研究区内 1998、2003、2008、2013 及 2018 年的 Landsat TM/OLI 影像进行监督分类得到 5 个时期土地利用数据并定量分析 1998 ~ 2018 年京津冀地区土地利用动态变化规律, 再利用生态服务价值 (ESV) 当量估算方法定量估算京津冀地区的 ESV 并结合 15 km × 15 km 尺度格网探究其时空动态变化. 结果表明: ① 1998 ~ 2018 年间, 京津冀地区 6 种土地利用类型中建设用地 (增加 16.67%) 及草地 (减少 13.73%) 面积占比变化幅度最大, 水体 (减少 0.2%) 面积占比变化幅度最小. ② 京津冀地区 ESV 总价值在 1998 ~ 2003 年间出现短暂增长 (增加 91.97 亿元), 2003 ~ 2018 年间持续降低 (减少 239.07 亿元), 主要与建设用地面积在除 1998 ~ 2003 年的其余 3 个时间段扩张较快有关, 6 种土地利用类型中林地提供的 ESV 最高, 建设用地及未利用土地提供的 ESV 最低. ③ 基于 15 km × 15 km 尺度格网的 ESV 时空分析表明, 1998 ~ 2018 年间京津冀地区 ESV 中等区逐渐减少, ESV 较低区及较高区逐渐增加, 且 ESV 较低区增速高于较高区. ④ 1998 ~ 2018 年间, 京津冀地区 6 种土地利用类型对价值系数的敏感性系数 (SI) 范围为 0 ~ 0.40, 且均低于 1, 表明本文 ESV 对修订后的生态系统服务价值系数缺乏弹性, 证明本文定量估算 ESV 的结果是可靠的. 在未来经济发展中, 京津冀地区应合理优化土地利用格局, 加强对林地、草地、水体及耕地的保护. 研究可为制定可持续发展战略, 建设生态友好型社会提供参考.

关键词: 谷歌地球引擎 (GEE); 生态系统服务价值 (ESV); 土地利用变化; 格网尺度; Landsat TM/OLI

中图分类号: X171.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2019)12-5473-11 **DOI:** 10.13227/j.hjks.201905079

Influence of Land Use Change on Ecosystem Service Value Based on GEE in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 1998 to 2018

LOU Pei-qing, FU Bo-lin*, LIN Xing-chen, BI Lu, MA Rui-xue, TANG Ting-yuan

(Guangxi Key Laboratory of Spatial Information and Surveying, College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China)

Abstract: In sustainable development assessment of the Beijing-Tianjin-Hebei region, the ability to dynamically estimate the value of ecosystem services is of great significance. This study considers the Beijing-Tianjin-Hebei region as the research area, based on the google earth engine (GEE); the classification and decision tree (CART) classification algorithm was adopted to supervise and classify the Landsat Thematic Mapper/Operational Land Imager (TM/OLI) images in the study area in 1998, 2003, 2008, 2013, and 2018, and land use types in these five periods were obtained. Quantitative analysis of the dynamic changes of land use in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 1998 to 2018 was carried out. Then, the ecosystem service value (ESV) equivalent estimation method was used to quantitatively estimate the ESV in the Beijing-Tianjin-Hebei region and combine it with a 15 km × 15 km scale grid to detect its temporal and spatial dynamics. The main results were as follows. ① From 1998 to 2018, the area of construction land (increased by 16.67%) and grassland (reduced by 13.73%) in the six land use types in the Beijing-Tianjin-Hebei region was the largest, and the change in the proportion of water bodies (0.2%) was the smallest. ② The total value of ESV in the Beijing-Tianjin-Hebei region experienced a short-term increase from 1998 to 2003 (an increase of 91.97×10^8 yuan), and continued to decrease from 2003 to 2018 (a decrease of 239.07×10^8 yuan), mainly related to the expansion of construction land area in the other three time periods excluding 1998 and 2003. Among the six land use types, the forest provides the highest value of ecosystem services, and the construction land and unused land provide the lowest value of ecosystem services. ③ The ESV time-space analysis based on the 15 km × 15 km scale grid showed that the ESV medium area in the Beijing-Tianjin-Hebei region gradually decreased from 1998 to 2018, the ESV lower area and the higher area gradually increased, and the ESV lower-area growth rate was higher than for the higher area. ④ The revised value of the Beijing-Tianjin-Hebei region (sensitivity coefficient range 0-0.83) has good significance and reliability. In future economic development, the Beijing-Tianjin-Hebei region should rationally optimize the land use pattern and strengthen the protection of forest land, grassland, water bodies and cultivated land.

Key words: google earth engine (GEE); ecosystem service value (ESV); land use change; grid scale; Landsat TM/OLI

收稿日期: 2019-05-12; 修订日期: 2019-07-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41801071); 广西自然科学基金项目 (2018GXNSFBA281015); 桂林理工大学科研启动基金项目 (GUTQDJJ2017096); 广西八桂学者团队项目

作者简介: 娄佩卿 (1995 ~), 男, 硕士, 主要研究方向为遥感与 GIS 应用, E-mail: gislou@126.com

* 通信作者, E-mail: fbl2012@126.com

生态系统服务(ecosystem service)是指人类自生态系统生态过程中直接或间接获取的效益,包含食物生产、原料生产及水源供给等供给服务,气体调节及净化环境等调节服务,维持养分循环、土壤保持及生物多样性等支持服务,还包含娱乐文化等文化服务功能^[1~3]。对生态系统服务价值进行定量估算有助于推进区域可持续发展^[4]、高效合理配置土地资源^[5]及制定科学的生态补偿政策^[6]提供技术支持和科学依据。正因生态系统服务与人类社会息息相关,因此越来越多国内外学者致力于研究生态系统服务价值(ecosystem service value,ESV)的定量估算方法^[7,8]。如 Costanza 等^[9]通过对多种类型生态系统服务进行定量评估,实现了 ESV 的货币表达,该评价方法推动 ESV 相关研究进入新阶段,且沿用至今。谢高地等^[10,11]基于 Costanza 所提出的评价方法并结合中国实际情况修订了中国多种陆地生态系统单位面积 ESV 当量表,此表被广泛应用于中国各种生态系统的 ESV 定量评估。

土地利用/土地覆盖变化(land-use and land-cover change,LUCC)是生态系统服务变化的主要驱动因素之一,LUCC 引起的生态系统面积、类型及分布格局的变化直接影响生态系统提供服务价值的多少^[12]。当前城市化进程带来一系列生态环境问题,如生物栖息地被破坏导致物种多样性降低^[13]、环境污染严重^[14]和热岛效应持续增强^[15]等。针对这些问题,近年来国内外学者开展关于 LUCC 变化对地区 ESV 变化影响的研究。如 Wang 等^[16]对 1990~2010 年间我国横断山区 LUCC 对 ESV 造成的影响进行了动态分析,发现由于受退耕还林还草的影响,当地 ESV 显著提高。Yan 等^[17]对我国三江平原近 60 年来的 LUCC 变化对 ESV 造成的影响进行分析发现,由于受人类活动影响,大量湿地转化为耕地,致使当地 ESV 下降。已有研究表明,虽然现有关于 LUCC 变化对 ESV 影响研究体系已较为完善,但多集中于对县市级行政区、保护区及流域等小区域进行研究,且多依赖于已有的土地利用类型产品,亟需一套可实时快速进行大区域 LUCC 分类的研究技术,进而应用于地区 ESV 变化研究。

谷歌地球引擎(google earth engine,GEE)是专门应用于卫星影像及其它空间数据解译运算的开源智能云平台^[18]。GEE 提供全球 Landsat TM/OLI、Sentinel-1/2、MODIS 和 DMSP/OLS 灯光数据等多尺度、多源遥感数据,包含超过 200 个数据集,超过 500 万张遥感影像,容量达到 PB 级别,且每天都在增加。GEE 云平台改变了传统遥感软件下载收集数

据、预处理、信息提取、分析与应用进而获取专题信息的定式^[19]。通过 GEE 进行 JavaScript 及 Python 语言编程,解决了大尺度地学分析应用研究中数据收集难、数据量大及解译效率低下等弊端,可不受时间、空间限制,快速、批量处理数据,为遥感工作者提供极大便利。近两年 GEE 已被国外学者应用于农作物面积提取^[20]、水体提取及动态变化分析^[21]和城镇面积动态监测^[22]等方面,而国内 GEE 研究尚处于初始阶段。

根据上述背景,本文首次尝试将 GEE 运用于大尺度 ESV 动态监测,本文以京津冀地区为研究区,基于 GEE 云平台采用分类决策树(classification and regression tree,CART)分类算法对研究区内 1998、2003、2008、2013 及 2018 年的 Landsat TM/OLI 影像进行监督分类得到 5 个时期土地利用数据,并利用生态服务价值(ESV)当量估算方法定量估算 1998~2018 年京津冀地区 ESV 总量,进一步探究了 20 年来京津冀地区土地利用及 ESV 的时空动态变化规律,以期京津冀地区推进区域可持续发展、高效合理配置土地资源及制定科学生态补偿政策提供技术支持和科学依据。

1 研究区概况

京津冀地区包括北京市、天津市及河北省的石家庄、唐山、承德、保定、廊坊、邯郸、秦皇岛、张家口、沧州、邢台和衡水等 11 个地级市,地处华北平原,东经 113°04'~119°53',北纬 36°01'~42°37'之间。平均海拔 1 200~1 500 m,西北部以山地、高原为主,东南部以平原为主,总面积约 $2.18 \times 10^7 \text{ km}^2$ (图 1)。该地区属温带大陆性季风气候,四季分明,年均降水量 484.5 mm,降水量呈东南多西北少的分布特征。京津冀地区是“首都经济圈”,又是华北地区重要的粮棉产地。随着经济快速发展及城市化进程加快,京津冀地区的生态环境逐渐恶化,两者之间的矛盾日益尖锐化。

2 数据源及预处理

2.1 数据源

(1)Landsat 影像 源于 GEE 平台提供的 1998~2018 年 5 个时段的 Landsat TM(1998、2003 及 2008 年)及 Landsat OLI(2013 年及 2018 年)卫星影像,基于 GEE API 编程,筛选成像时间为当年 1~12 月。为筛选云量小于 8% 的 Landsat 影像及保证研究区内云量降至最低,1998 年共调用 828 景 Landsat TM 影像,2003 年共调用 446 景 Landsat TM 影像,2008 年共调用 399 景 Landsat TM 影像,2013 年共调

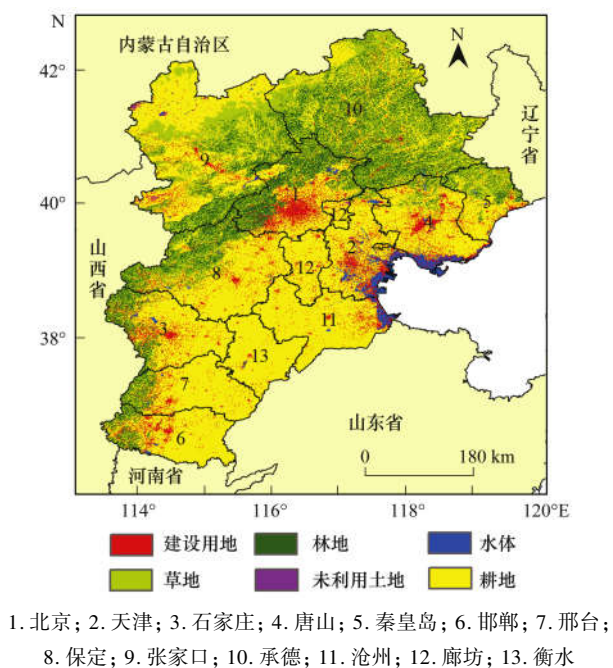


图 1 研究区概况及 1998 年土地利用类型

Fig. 1 Survey of the study area and land use types in 1998

用 369 景 Landsat OLI 影像,2018 年共调用 485 景 Landsat OLI 影像.

(2) 其它数据 SRTM DEM (Shuttle Radar Topography Mission) 数据源于美国“奋进号”航天飞机搭载的 SRTM 系统采集得到,空间分辨率 30m,可在 GEE 中直接调用;社会经济数据源于 1998 ~ 2018 年京津冀地区统计年鉴. 训练样本数据以及精度验证数据源于 Google Earth Pro 软件中目视解译选取.

2.2 数据预处理

首先基于 GEE 平台内部 API 编程对筛选出的 Landsat 影像进行辐射定标、大气校正、影像去云、影像拼接等处理,并转换为大气表观反射率 (top of atmosphere reflectance, TOA) 图像,调用 GEE 平台中的 SRTM DEM 数据辅助训练,计算归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 及归一化水体指数 (normalized difference water index, NDWI) 以提高对植被及建筑物的分类精度.

在 Google Earth Pro 中对 1998、2003、2008、2013 及 2018 年这 5 个时间段的高分辨率影像进行目视解译,并将京津冀地区土地利用类型划分为建设用地、林地、水体、草地、未利用土地及耕地这 6 种,按照每种土地利用类型在研究区内的多少选取适量样本点 (表 1),并将样本点以 kml 格式自 Google Earth Pro 中导出,在 ArcMap 中转化为 shapefile 格式,以便导入 GEE API 中进行调用,将样本点中 70% 作为训练样本,30% 作为验证样本,样本点 (440 个) 分布如图 2 所示.

表 1 土地利用类型及各类别样本数目

Table 1 Types of land use and number of different types of land use

土地利用类型	描述	样本数
建设用地	城镇用地、农村居民点、道路	120
林地	有林地、灌木林、疏林地	70
水体	河渠、湖泊、水库、滩涂、湿地	40
草地	高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地	50
未利用土地	沙地、戈壁、裸地	40
耕地	水田、旱地	120

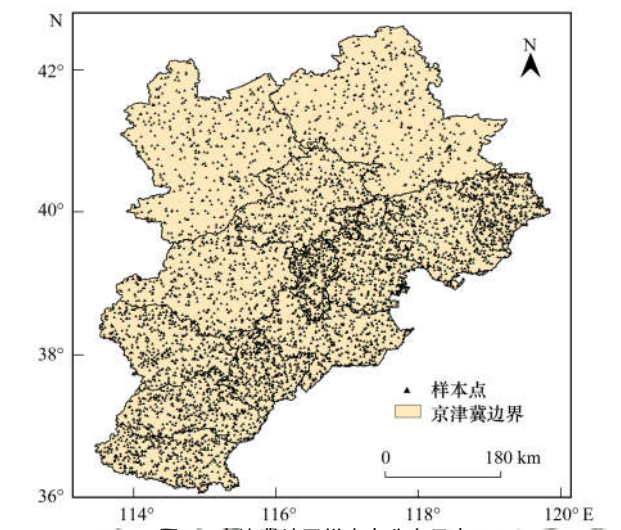


图 2 京津冀地区样本点分布示意

Fig. 2 Distribution of sample points in the Beijing-Tianjin-Hebei region

3 研究方法

3.1 基于 GEE 的 CART 土地利用分类

CART 方法是由 Breiman^[23] 提出的一种基于经典决策树的二分递归分类算法,具有实现简单、结构清晰、运行快速及分类准确等优点,目前该方法已被国内外学者广泛应用于土地利用分类^[24]. 其基本原理是将包含测试变量与目标变量的训练集 (当前样本集) 进行循环迭代划分为 2 个子样本集,使每个非叶子节点有 2 个分支,进而形成基于决策树的二叉树结构^[25]. 为减少“过拟合”现象, CART 算法通过交叉验证对决策树进行修剪,对保持低错误率的树枝予以保留,由此构建兼顾复杂度及错误率的最优二叉树^[26]. CART 分类的学习样本集如式 (1) ~ (3) 所示,式中 $M_1, M_2, \dots, M_m$ 为属性向量, N 为标签向量:

$$L = \{M_1, M_2, \dots, M_m, N\}$$
 (1)

$$M_1 = (M_{11}, M_{12}, \dots, M_{1l_1}), \dots, M_m = (M_{m1}, M_{m2}, \dots, M_{ml_n})$$
 (2)

$$N = (N_1, N_2, \dots, N_k)$$
 (3)

于 GEE API 中直接调用 CART 分类算法,参数设置:交叉验证因子为 10,最大树深为 10,最小叶子节点为 2,修剪误差容限为 0.5,随机种子个数为 100.

对研究区 Landsat 影像进行土地利用类型划分. 采用 GINI 系数作为选择预测变量最佳分割阈值的度量标准^[27]. GINI 系数定义如式(4)~(6)所示:

$$\text{GINI Index} = 1 - \sum_e \hat{P}^2(e|f) \tag{4}$$

$$P(e|f) = \frac{n_e(f)}{n(f)} \tag{5}$$

$$\sum_{e=1}^E P(e|f) = 1 \tag{6}$$

式中, e 为样本类别个数; $n_e(f)$ 为测试变量值为 f 时训练样本中属于第 e 类的样本个数; $n(f)$ 为测试变量值为 f 时训练样本的个数; $P(e|f)$ 为训练样本集中一个随机样本对应测试变量值为 f 时该样本属于第 e 类的概率.

本文以土地利用类型(表1)为目标变量,所选用的分类特征为测试变量. 通过在 GEE API 平台中进行多次可视化实验对比,选取 Landsat OLI 影像的 B2、B3、B4、B5、B6 及 B7 波段(Landsat TM 影像选取与之对应的 6 个波段),辅以 SRTM DEM、NDVI 及 NDWI 共 9 个波段作为 CART 算法的测试变量,以本文构建的 6 种(建设用地、林地、水体、草地、未利用土地及耕地)土地利用类型作为分类体系,基于训练样本点确定分类特征与土地利用类型间的决策树及最佳阈值,最终应用于京津冀地区

Landsat TM/OLI 影像分类.

3.2 分类结果精度验证

为初步验证在 GEE API 平台中基于 CART 算法的土地利用类型分类结果,将 CART 分类验证(误差矩阵精度评价)结果导出,精度评价标准为总体精度及 Kappa 系数,5 个时期的总体精度分别为 82.29%、98.34%、94.93%、81.80% 及 95.44%,Kappa 系数分别为 0.68、0.97、0.82、0.73 及 0.93. 通过与于文婧等^[28]的研究结果进行对比,本文 2003、2008 及 2018 年这 3 个时期分类总体精度较高(高 2.67%~6.08%),而 1998 年及 2013 年这 2 个时期受限于样本质量,总体精度较低(低 9.97%~10.46%).

为保证在 GEE API 平台中基于 CART 算法的土地利用类型分类结果准确性,采用在 Google Earth Pro 软件中的高分辨率影像选取验证点(每个时期选择 160 个验证点),目视解译判断验证点地物类别,导入 GEE API 中开展分类精度验证及空间一致性分析. 结果表明 1998 年 140 个验证点类别正确,验证精度为 87.5%;2003 年 130 个验证点类别正确,验证精度为 81.3%;2008 年 138 个验证点类别正确,验证精度为 86.3%;2013 年 134 个验证点类别正确,验证精度为 83.8%;2018 年 145 个验证点类别正确,验证精度为 90.5%. 分类精度满足本文要求,精度验证矩阵见表 2.

表 2 1998~2018 年京津冀地区土地利用精度验证混淆矩阵

Table 2 Land use accuracy verification confusion matrix of Beijing-Tianjin-Hebei region from 1998 to 2018

年份	土地利用类型	建设用地	林地	水体	草地	未利用土地	耕地
1998	建设用地	16	0	1	0	2	0
	林地	0	34	0	4	0	3
	水体	0	0	9	0	0	1
	草地	0	1	0	37	0	2
	未利用土地	1	0	0	0	5	0
	耕地	0	1	2	3	0	39
2003	建设用地	17	0	0	0	1	0
	林地	1	39	0	6	0	4
	水体	0	0	10	0	0	2
	草地	1	3	0	33	0	5
	未利用土地	1	0	0	0	6	0
	耕地	0	3	0	2	0	25
2008	建设用地	20	0	0	0	2	0
	林地	0	36	1	3	0	3
	水体	0	0	9	0	1	1
	草地	0	5	0	37	0	2
	未利用土地	1	0	1	0	10	0
	耕地	0	1	2	1	0	26
2013	建设用地	16	0	2	0	2	0
	林地	0	39	0	4	0	3
	水体	0	0	8	0	0	2
	草地	0	6	0	41	0	2
	未利用土地	1	0	0	0	10	0
	耕地	0	2	1	20	0	1
2018	建设用地	20	0	0	0	1	0
	林地	0	39	0	3	0	4
	水体	0	0	10	0	0	1
	草地	0	2	0	33	0	2
	未利用土地	0	0	0	0	10	0
	耕地	0	0	0	2	0	33

3.3 生态系统服务价值计算

本文基于 Costanza 等^[9]及谢高地等^[11]学者建立的中国陆地生态系统服务价值系数表,并结合京津冀地区土地利用实际情况,以城市-建设用地、森林-林地、水体-水体、草地-草地、荒地-未利用土地及农田-耕地的形式将每种生物群落一一对应,为避免直接使用该方法影响结果精度及完整性,参考已被广泛应用的谢高地等^[29]制定的中国各省份农田生态系统生物量因子表进行修正,其中北京市修正系数为 1.04,天津市修正系数为 0.85,河北省修正系数为 1.02。根据京津冀地区统计年鉴相关数据可知京津冀地区 1998 ~ 2018 年平均粮食产量为 2 150.80 kg·hm⁻²,经过公式(7)计算得到京津冀地区修正系数为 1.01。以 1 个生态服务价值当量的经济价值为当年京津冀地区平均粮食单产市场价值的 1/7^[10]为计算依据,结合 1998 ~ 2018 年平均粮食价格(2.88 元·kg⁻¹),得出农田自然粮食产的经济价值约为 884.90 元·hm⁻²。由此计算出京津冀地区不同生态系统单位面积生态服务价值(表 3)。建设用

地本身不具备生产及调节功能,本文基于京津冀地区统计年鉴中城镇旅游产值数据并以约旦古丽卡斯木等^[30]的研究结果为参考求得京津冀地区建设用地价值系数。

$$X = \sum_{i=a,b,c}^I \frac{i \times i_e}{1\,256.89} \quad (7)$$

式中, X 为京津冀地区修正系数, a 、 b 和 c 分别为北京市、天津市和河北省平均粮食产量,单位为 kg·hm⁻²; i_e 为对应地区的修正系数。ESV 计算公式如下:

$$ESV = \sum (S_i \times VC_i) \quad (8)$$

$$ESV_j = \sum (S_i \times VC_{ij}) \quad (9)$$

式中, ESV_j 为京津冀地区生态系统各类服务价值,单位为元; ESV 为京津冀地区生态系统服务价值总量,单位为元; S_i 为第 i 类土地利用类型面积,单位为 hm²; VC_{ij} 为各类服务功能价值系数,单位为元·(hm²·a)⁻¹; VC_i 为第 i 类土地利用类型对应的价值系数,单位为元·(hm²·a)⁻¹。

表 3 京津冀地区单位面积生态系统服务价值系数/元·(hm²·a)⁻¹

Table 3 Ecosystem service in the Beijing-Tianjin-Hebei region equivalent value per unit area/Yuan·(hm²·a)⁻¹

服务功能类型	生态系统服务价值					
	建设用地	林地	水体	草地	未利用土地	耕地
食物生产	0	88.50	88.50	265.50	8.80	884.90
原材料	0	2 300.06	8.80	44.20	0	88.50
水资源供给	0	2 831.50	18 033.20	707.90	26.50	530.90
气体调节	0	3 097.00	79.83	707.90	0	442.40
净化污染	0	1 159.20	8 782.00	593.60	264.30	76.70
养分循环	0	114.93	0.72	132.75	8.80	90.13
土壤保持	0	1 670.30	90.63	1 533.70	90.24	790.20
生物多样性	0	2 884.60	266.03	1 473.62	87.30	79.02
娱乐文化	88.57	1 132.63	184.65	695.40	43.21	50.36
总计	88.57	15 278.72	33 534.36	6 154.57	529.15	3 033.11

3.4 基于格网尺度的 ESV 时空变换

基于格网单元对京津冀地区 ESV 空间分布进行分析可以在空间上进一步细化研究尺度,使得到的研究结果更为切合实际,可操作性更强^[31]。由于研究区面积较大,本文基于 ArcGIS 10.2 软件创建格网单元,经实验得到最优格网单元为 15 km × 15 km,最终划分得到的格网单元数量为 1 395 个(边缘地带格网面积有差异)。基于 15 km × 15 km 格网单元对 5 个时期的土地利用数据进行分析提取,分析格网单元内各土地利用类型面积及其变化程度。格网边长确定公式如下^[32]:

$$H = (1/2) \times [\min(A_i)]^{1/2} \quad (10)$$

式中, H 为最优格网边长; A_i 为土地利用类型图最小图斑的面积。

3.5 价值系数敏感性模型

本文使用 ESV 价值系数敏感性分析模型^[33,34],通过调整修订后的各土地利用类型 ESV 价值系数的大小(上下调整 50%)来计算 ESV 对价值系数变化的响应程度,最终得到 ESV 随时间变化情况与价值系数的相关性。敏感性系数(sensitivity index, SI)计算公式如下:

$$SI = \left| \frac{(ESV_j - ESV_i)/ESV_i}{(VC_{jx} - VC_{ix})/VC_{ix}} \right| \quad (11)$$

式中,SI 为敏感性系数,ESV 为估算得到的生态系统服务价值,VC 为价值系数; i 和 j 分别为初始值及调整值。当 $SI \leq 1$ 时,表明 ESV 缺乏弹性;当 $SI \geq 1$ 时,表明 ESV 富有弹性;且 SI 越大,ESV 价值系数准确性越高。

4 结果与讨论

4.1 土地利用变化

由图 3 及表 4 可知,1998~2018 年间,京津冀地区土地利用类型变化较为明显,建设用地、林地和草地覆盖面积最大(均在 10% 以上),是主要土地利用类型. 京津冀地区 6 种土地利用类型中林地及草地主要分布于西北部(承德市,张家口市东南部,保定市、北京市、石家庄市、邢台市及邯郸市西部

地区),该地区多山地、丘陵,不适宜城镇建设及耕种,且属于三北防护林建设地区,故多为林地及草地;建设用地、耕地主要分布于东南部(秦皇岛市、天津市、廊坊市、沧州市、衡水市、保定市、北京市、石家庄市、邢台市及邯郸市的东部地区),该地区多平原,适宜城镇建设及农作物耕种,故多为建设用地及耕地;水体多分布于渤海湾沿海地区,该地区靠近海洋,雨水丰沛,河流、池塘、水库汇集;建设用地则多分布于各大城市中,多为建设中的裸地.

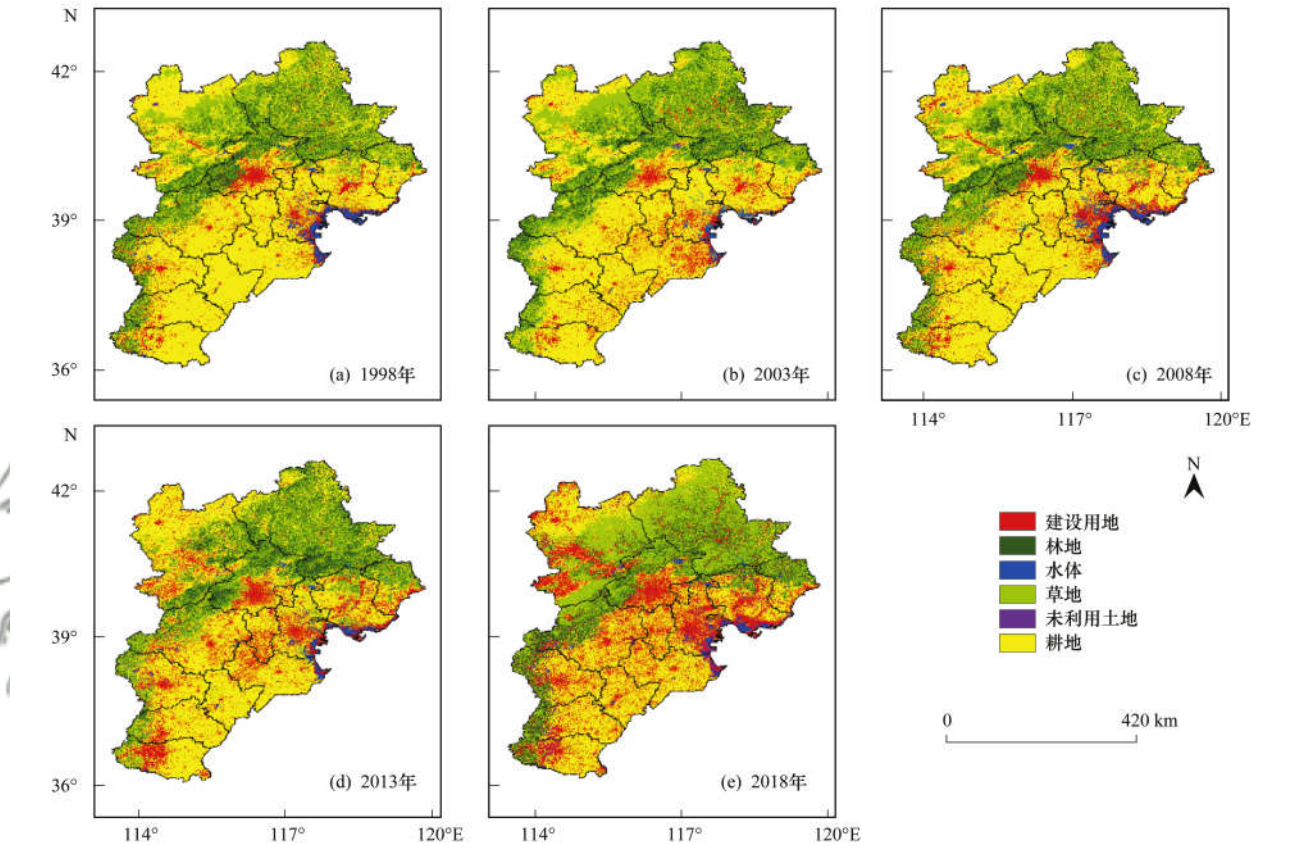


图 3 1998~2018 年京津冀地区土地利用变化

Fig. 3 Land use change map in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 1998 to 2018

表 4 京津冀地区土地利用变化格局

Table 4 Land use change pattern in the Beijing-Tianjin-Hebei region

年份	项目	土地利用类型					
		建设用地	林地	水体	草地	未利用土地	耕地
1998	面积/ 10^4 hm^2	321.55	626.10	48.61	895.06	0.44	288.25
	占比/%	14.75	28.72	2.23	39.40	0.02	13.22
2003	面积/ 10^4 hm^2	327.22	654.22	79.57	844.97	5.67	268.58
	占比/%	15.01	30.01	3.65	38.76	0.26	12.32
2008	面积/ 10^4 hm^2	402.21	667.52	88.51	779.79	11.34	230.43
	占比/%	18.45	30.62	4.06	35.77	0.52	10.57
2013	面积/ 10^4 hm^2	545.22	678.20	79.35	638.09	20.72	218.43
	占比/%	25.01	31.11	3.64	29.27	0.95	10.02
2018	面积/ 10^4 hm^2	684.95	696.33	44.25	559.57	43.16	151.73
	占比/%	31.42	31.94	2.03	25.67	1.98	6.96

总体上,京津冀地区 6 种土地利用类型中建设用 地(增加 16.67%)及草地(减少 13.73%)面积占比变

化幅度最大,水体(减少 0.2%)面积占比变化幅度最小。其中建设用地、未利用土地及林地快速增加,是由于城市化进程不断加快以及三北防护林建设的阶段性成果;耕地及草地不断减少,是由于人们环保意识的提升,退耕还林还草,草地逐渐转化为林地。

4.2 土地利用转移

本文用土地利用转移矩阵反映京津冀地区土地利用类型整体的变化方向及变化强度。由表 5 可知,在 1998 ~ 2018 年间,京津冀地区 6 种土地利用类型之间均有不同程度的转化,其中耕地变化幅度最大,178.40 × 10⁴ hm² 的耕地转化为建设用地,17.25 × 10⁴ hm² 的耕地转化为未利用土地,说明随

着社会经济的发展,城市化进程的推进侵占了大量耕地;26.55 × 10⁴ hm² 的耕地转化为林地,57.46 × 10⁴ hm² 的耕地转化为草地,8.92 × 10⁴ hm² 的耕地转化为水体,说明受人们环保意识提升的影响,治理围湖造田及退耕还林还草取得阶段性成果。草地变化幅度仅次于耕地,231.82 × 10⁴ hm² 的草地转化为林地,体现了三北防护林的建设行之有效;33.69 × 10⁴ hm² 的草地转化为建设用地,也是受城市化进程的影响。林地、建设用地及未利用土地的土地转化程度较小,相对较为明显的转化为 44.61 × 10⁴ hm² 的林地转化为草地,8.51 × 10⁴ hm² 的建设用地转化为未利用土地,其余转化面积较少,故不加赘述。

表 5 1998 ~ 2018 年京津冀地区土地利用转移矩阵/10⁴ hm²

土地利用类型	建设用地	林地	水体	草地	未利用土地	耕地
建设用地	117.47	2.33	5.49	7.68	8.51	72.10
林地	6.30	357.16	0.19	44.61	0.23	7.31
水体	7.36	0.45	20.24	0.01	2.92	1.29
草地	33.69	231.82	0.23	268.02	5.16	95.48
未利用土地	0.13	0.00	0.06	0.02	0.11	0.04
耕地	178.40	26.55	8.92	57.46	17.25	1 026.84

4.3 ESV 变化

4.3.1 各服务功能 ESV 变化

由表 6 可知,1998 ~ 2018 年间,京津冀地区除了制造原材料功能的服务价值在各时期均有所增加,其余功能的服务价值总体上均呈现下降趋势。由于 1998 ~ 2003 年间建设用地面积增长较少(面积占比增加 0.26%),且林地(面积占比增加 1.29%)及水体(面积占比增加 1.42%)增长较多,故除了食物生产、养分循环、土壤保持等功能外均有一定程度的增长。1998 年京津冀地区 ESV 总价值为

1 731.62 亿元,2003 年总价值为 1 823.59 亿元,2008 年总价值为 1 816.82 亿元,2013 年总价值为 1 719.58 亿元,2018 年为 1 584.52 亿元。京津冀地区 ESV 总价值在 1998 ~ 2003 年间出现短暂增长,2003 ~ 2018 年间持续降低主要与城市化进程的推进导致建设用地与未利用土地面积占比越来越大有关,建设用地面积在除 1998 ~ 2003 年的其余 3 个时间段增幅明显,耕地及水体所占面积也持续减少,多种原因综合导致 1998 ~ 2018 年京津冀地区 ESV 总价值呈减少趋势,共减少 147.10 亿元。

表 6 1998 ~ 2018 年京津冀地区各服务功能 ESV 变化/亿元·a⁻¹

服务功能	生态系统服务价值					趋势
	1998 年	2003 年	2008 年	2013 年	2018 年	
食物生产	55.24	52.70	47.03	42.99	34.88	减少
原材料	150.56	156.66	159.10	160.81	164.02	增加
水资源供给	343.61	402.82	416.09	391.95	324.74	减少
气体调节	270.40	274.94	272.83	265.51	262.33	减少
净化污染	170.62	198.08	203.46	188.40	155.10	减少
养分循环	21.68	21.17	20.12	18.26	16.84	减少
土壤保持	265.07	261.10	250.21	229.31	214.91	减少
生物多样性	316.08	317.52	311.74	293.68	286.08	减少
娱乐文化	138.36	138.60	136.24	128.67	125.62	减少
总计	1 731.62	1 823.59	1 816.82	1 719.58	1 584.52	减少

4.3.2 各土地利用类型 ESV 变化

由表 7 可知,1998 ~ 2018 年京津冀地区 6 种土地利用类型中,林地提供的 ESV 最高,约占总价值的 60%,且呈持续增加的态势;草地提供的 ESV 其次,

约占总价值的 25%,但呈持续减少的态势;水体提供的 ESV 也较高,约占总价值的 10% 左右,且在 1998 ~ 2008 年间呈增长态势,2008 ~ 2018 年间呈减少态势;耕地提供的 ESV 约占总价值 5% 左右,呈持续减少态

势;建设用地及未利用土地所提供的 ESV 虽呈现增加态势,但相对 ESV 总价值来说极少(不足 1%)。

对于京津冀地区来说,1998~2018 年间林地及草地的 ESV 贡献最大,建设用地及未利用土地的 ESV 贡献最小,故在城市化进程中合理规划建设用地及未利用土地面积,进一步加强三北防护林建设及草地资源保护,建设生态友好型城市是改善京津冀地区生态环境,提高 ESV 的关键。

表 7 1998~2018 年京津冀地区各土地利用类型 ESV 变化/亿元·a⁻¹

Table 7 ESV changes in land use types in Beijing-Tianjin-Hebei region from 1998 to 2018/10⁸ Yuan·a⁻¹

土地利用类型	生态系统服务价值				
	1998 年	2003 年	2008 年	2013 年	2018
建设用地	2.85	2.90	3.56	4.83	6.07
林地	956.60	999.56	1 019.89	1 036.20	1063.90
水体	163.01	266.83	296.81	266.10	148.39
草地	550.87	520.04	479.93	392.72	344.39
未利用土地	0.02	0.30	0.60	1.10	2.28
耕地	87.43	81.46	69.89	66.25	46.02
总计	1 731.62	1 823.59	1 816.82	1 719.58	1 584.52

4.3.3 基于格网尺度的 ESV 空间变化

通过对京津冀区域 15 km × 15 km 尺度格网 ESV 空间分布进行分析(图 4 和表 8)可知,1998~2018 年京津冀地区 ESV 变化明显,从空间分布来看,ESV 较低区主要分布于城市及村镇;ESV 中等区主要分布于耕地及覆盖度较低的草地地区;ESV 较高区主要分布于水体、高覆盖度草地及林地地区。从不同年份各级别 ESV 分布的空间变化来看,ESV 较低区面积占比逐年增加,由 1998 年面积占比 7.57% (面积 165.03 × 10⁴ hm²) 增加到 2018 年面积占比 23.51% (面积 512.52 × 10⁴ hm²),主要原因是建设用地及未利用土地面积的增加;ESV 中等区面积占比逐年减少,由 1998 年面积占比 70.18% (面积 1529.92 × 10⁴ hm²) 减少到 2018 年面积占比 40.97% (面积 893.15 × 10⁴ hm²),主要原因为耕地及草地的覆盖面积逐年减少;ESV 较高区面积占比逐年增加,由 1998 年面积占比 22.25% (面积 485.05 × 10⁴ hm²) 增加到 2018 年面积占比 35.52% (面积 774.33 × 10⁴ hm²),主要原因为林地的覆盖面积不断增加。

表 8 1998~2018 年不同等级 ESV 面积变化

Table 8 Changes in ESV area of different grades from 1998 to 2018

年份	项目	ESV 等级			
		较低区	中等区	较高区	总计
1998	面积/10 ⁴ hm ²	165.03	1 529.92	485.05	2 180
	占比/%	7.57	70.18	22.25	100
2003	面积/10 ⁴ hm ²	228.25	1 368.39	583.36	2 180
	占比/%	10.47	62.77	26.76	100
2008	面积/10 ⁴ hm ²	330.92	1 221.45	627.63	2 180
	占比/%	15.18	56.03	28.79	100
2013	面积/10 ⁴ hm ²	409.84	1 047.96	695.20	2 180
	占比/%	18.80	49.31	31.89	100
2018	面积/10 ⁴ hm ²	512.52	893.15	774.33	2 180
	占比/%	23.51	40.97	35.52	100

4.4 价值系数敏感性分析

由图 5 和表 9 可知,1998~2018 年间,京津冀地区 6 种土地利用类型对价值系数的 SI 范围为 0~0.40,均低于 1,表明本文 ESV 对修订后的生态系统服务价值系数缺乏弹性,也间接表明本文定量估算 ESV 的结果是可靠的。林地的 SI 最高,5 个时期均在 0.3 左右;其次为草地(0.1 左右)、水体(0.05 左右)及耕地(0.02 左右);建设用地(0.01 左右)及未利用土地(0 左右)的 SI 则较低。在京津冀地区,林地、水体、草地及耕地等土地利用类型在生态系统服务中所占权重较高。对于计算得到的 1998~2018 年 ESV 来说,价值系数具有良好的显著性,表明修订后的研究区 ESV 价值系数具有可靠性。

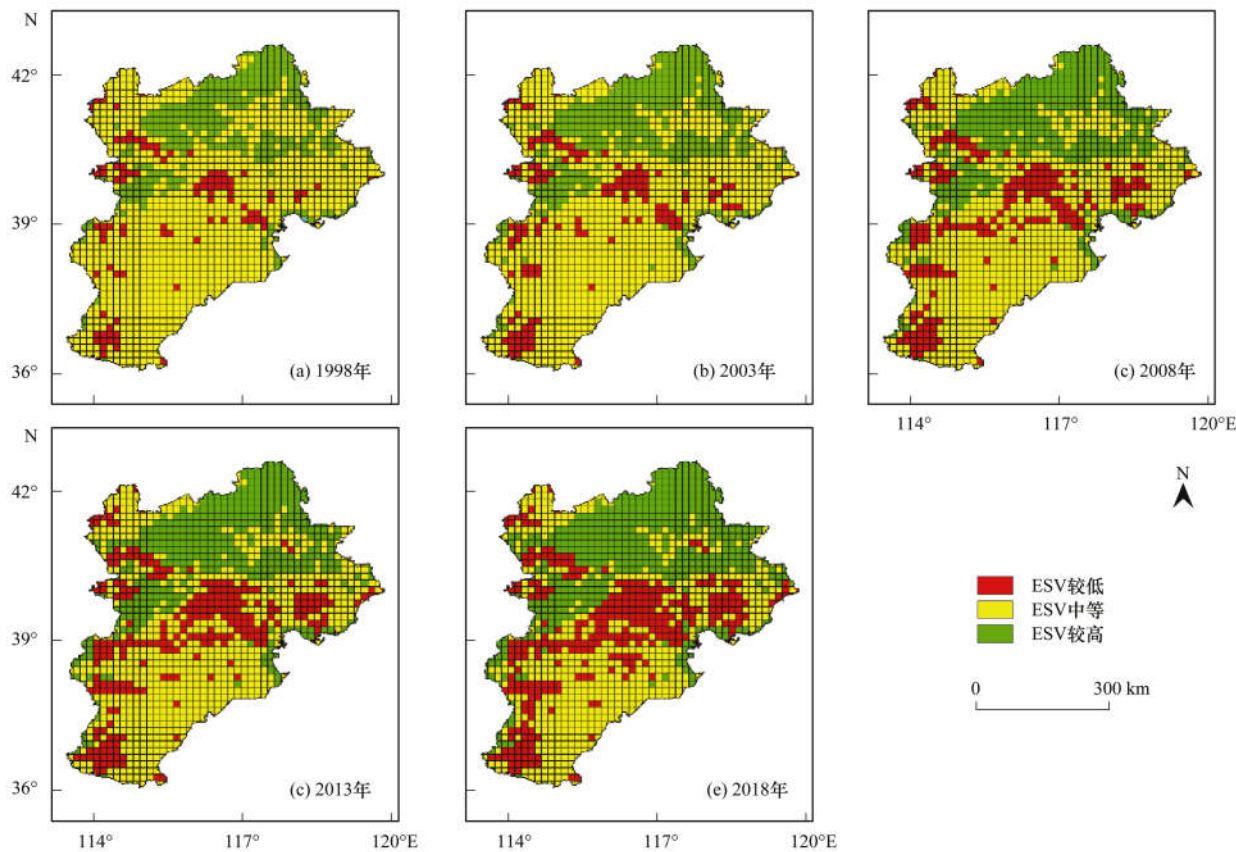


图 4 1998 ~ 2018 年京津冀地区 15 km × 15 km 网格 ESV 空间变化

Fig. 4 Spatial variation map of 15 km × 15 km grid ESV in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 1998 to 2018

表 9 1998 ~ 2018 年京津冀地区各土地类型敏感性系数

Table 9 Sensitivity indexes of land types in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 1998 to 2018

土地利用类型	敏感性系数 (SI)				
	1998 年	2003 年	2008 年	2013 年	2018 年
建设用地	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002
林地	0.281	0.276	0.282	0.301	0.335
水体	0.047	0.073	0.082	0.077	0.047
草地	0.159	0.143	0.132	0.114	0.109
未利用土地	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
耕地	0.025	0.022	0.019	0.019	0.015

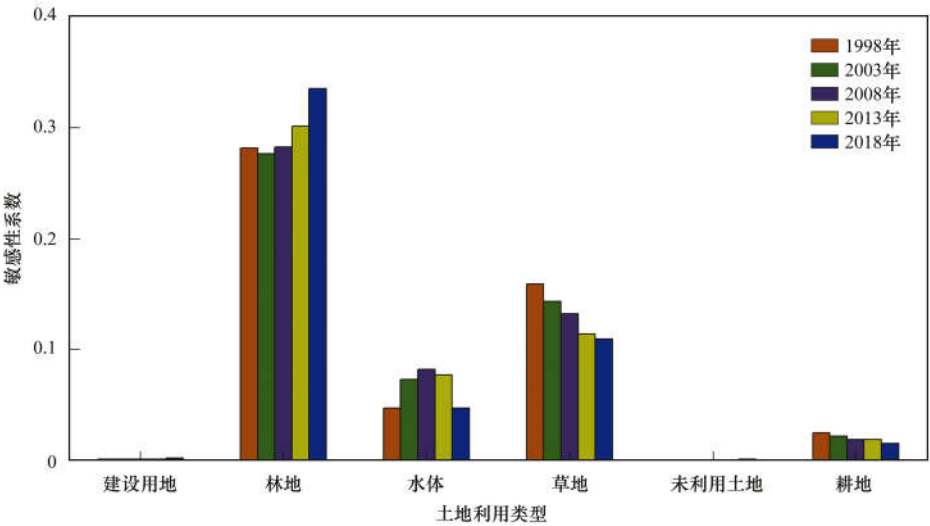


图 5 1998 ~ 2018 年 6 种土地利用类型敏感性系数

Fig. 5 Sensitivity indexes of six land use types from 1998 to 2018

5 结论

(1) 伴随城市化进程和社会经济的快速发展, 1998~2018 年间, 京津冀地区土地利用变化显著, 6 种土地利用类型中建设用地(增加 16.67%)、未利用土地(由 0.02% 增至 1.98%)及草地(减少 13.73%)面积占比变化幅度最大, 水体(减少 0.2%)面积占比变化幅度最小. 林地(增加 3.22%)面积占比变化幅度较小.

(2) 京津冀地区 ESV 总量在 1998~2003 年间呈增长趋势(增加 91.97 亿元), 在 2003~2018 年持续减少趋势(减少 239.07 亿元). 林地提供的 ESV 最高, 未利用土地提供的 ESV 最低. 其中建设用地、林地及未利用土地的 ESV 呈增长趋势, 草地及耕地的 ESV 呈减少趋势, 水体的 ESV 呈先增后减趋势. 京津冀 9 种生态系统服务中, 水资源供给、气体调节、土壤保持及生物多样性是影响总 ESV 的 4 大生态系统服务功能, 所贡献的 ESV 占比总 ESV 的 70%; 而养分循环及食物生产所贡献的 ESV 较少, 仅占比约 4.5%.

(3) 1998~2018 年基于 15 km × 15 km 尺度格网的京津冀地区各等级 ESV 分布特征均为: 中等区 ≥ 较高区 ≥ 较低区, 20 年间中等区面积不断减少, 从 1998 年面积占比 70.18% 至 2018 年面积占比 40.97%, 减少了 29.21%; 较高区及较低区不断增加, 且较低区(20 年间增长 15.94%)增长速率高于较高区(20 年间增长 13.27%).

(4) 1998~2018 年间, 京津冀地区 6 种土地利用类型对价值系数的 SI 范围为 0~0.40, 均低于 1, 表明 ESV 对修订后的生态系统服务价值系数缺乏弹性, 间接表明本研究定量估算 ESV 的结果是可靠的.

参考文献:

- [1] de Groot R S, Wilson M A, Boumans R M J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services[J]. *Ecological Economics*, 2002, **41**(3): 393-408.
- [2] 许鑫王豪, 邹欣庆, 刘晶茹. 苏北潮滩温室气体排放的时空变化及影响因素[J]. *环境科学*, 2016, **37**(6): 2383-2392.
- [3] Tamayo N C A, Anticamara J A, Acosta-Michlik L. National estimates of values of Philippine Reefs' ecosystem services[J]. *Ecological Economics*, 2018, **146**: 633-644.
- [4] 唐秀美, 郝星耀, 刘玉, 等. 生态系统服务价值驱动因素与空间异质性分析[J]. *农业机械学报*, 2016, **47**(5): 336-342.
- [5] 季香, 刘红玉, 李玉凤, 等. 不同雨强条件下河流水质对流域土地利用类型与格局空间响应[J]. *环境科学*, 2016, **37**(6): 2101-2112.
- [6] 姚小微, 曾杰, 李旺君. 武汉城市圈城镇化与土地生态系统服务价值空间相关特征[J]. *农业工程学报*, 2015, **31**(9): 249-256.
- [7] Wei F W, Costanza R, Dai Q, et al. The value of ecosystem services from Giant Panda reserves[J]. *Current Biology*, 2018, **28**(13): 2174-2180. e7.
- [8] Cao S X, Zhang J Z, Su W. Net value of wetland ecosystem services in China[J]. *Earth's Future*, 2018, **6**(10): 1433-1441.
- [9] Costanza R, D'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997, **387**(6630): 253-260.
- [10] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. *自然资源学报*, 2003, **18**(2): 189-196.
- [11] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. *自然资源学报*, 2015, **30**(8): 1243-1254.
- [12] Bryan B A, Ye Y Q, Zhang J E, et al. Land-use change impacts on ecosystem services value: Incorporating the scarcity effects of supply and demand dynamics[J]. *Ecosystem Services*, 2018, **32**: 144-157.
- [13] 范泽孟, 黄言, 岳天祥. 青藏高原维管植物物种丰富度分布的情景模拟[J]. *地理学报*, 2018, **73**(1): 164-176.
- [14] 孙爽, 李令军, 赵文吉, 等. 京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(4): 1585-1593.
- [15] 曹畅, 李旭辉, 张弥, 等. 中国城市热岛时空特征及其影响因子的分析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 3987-3997.
- [16] Wang Y H, Dai E F, Yin L, et al. Land use/land cover change and the effects on ecosystem services in the Hengduan Mountain Heterogeneity Analysis of Ecosystem Services Value[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, **47**(5): 336-342.
- [17] Ji X, Liu H Y, Li Y F, et al. Spatial response of river water quality to land use types and patterns under different rainfall intensities[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(6): 2101-2112.
- [18] Yao X W, Zeng J, Li W J. Spatial correlation characteristics of urbanization and land ecosystem service value in Wuhan Urban Agglomeration[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, **31**(9): 249-256.
- [19] Wei F W, Costanza R, Dai Q, et al. The value of ecosystem services from Giant Panda reserves[J]. *Current Biology*, 2018, **28**(13): 2174-2180. e7.
- [20] Cao S X, Zhang J Z, Su W. Net value of wetland ecosystem services in China[J]. *Earth's Future*, 2018, **6**(10): 1433-1441.
- [21] Costanza R, D'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997, **387**(6630): 253-260.
- [22] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. *自然资源学报*, 2003, **18**(2): 189-196.
- [23] Xie G D, Lu C X, Leng Y F, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, **18**(2): 189-196.
- [24] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. *自然资源学报*, 2015, **30**(8): 1243-1254.
- [25] Xie G D, Zhang C X, Zhang L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, **30**(8): 1243-1254.
- [26] Bryan B A, Ye Y Q, Zhang J E, et al. Land-use change impacts on ecosystem services value: Incorporating the scarcity effects of supply and demand dynamics[J]. *Ecosystem Services*, 2018, **32**: 144-157.
- [27] 范泽孟, 黄言, 岳天祥. 青藏高原维管植物物种丰富度分布的情景模拟[J]. *地理学报*, 2018, **73**(1): 164-176.
- [28] Fan Z M, Huang Y, Yue T X. Scenario simulation of species richness distribution of vascular plants in Qinghai-Tibet plateau[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, **73**(1): 164-176.
- [29] 孙爽, 李令军, 赵文吉, 等. 京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(4): 1585-1593.
- [30] Sun S, Li L J, Zhao W J, et al. Variation in pollutant concentrations and correlation analysis with the vegetation index in Beijing-Tianjin-Hebei[J]. *Environmental science*, 2019, **40**(4): 1585-1593.
- [31] 曹畅, 李旭辉, 张弥, 等. 中国城市热岛时空特征及其影响因子的分析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 3987-3997.
- [32] Cao C, Li X H, Zhang M, et al. Correlation analysis of the urban heat island effect and its impact factors in China[J]. *Environmental science*, 2017, **38**(10): 3987-3997.
- [33] Wang Y H, Dai E F, Yin L, et al. Land use/land cover change and the effects on ecosystem services in the Hengduan Mountain

Tang X M, Hao X Y, Liu Y, et al. Driving Factors and Spatial

- region, China[J]. *Ecosystem Services*, 2018, **34**: 55-67.
- [17] Yan F Q, Zhang S W. Ecosystem service decline in response to wetland loss in the Sanjiang Plain, Northeast China [J]. *Ecological Engineering*, 2019, **130**(7): 117-121.
- [18] 修晓敏, 周淑芳, 陈黔, 等. 基于 Google Earth Engine 与机器学习的省级尺度零散分布草地生物量估算[J]. *测绘通报*, 2019, **0**(3): 46-52+75.
- Xiu X M, Zhou S F, Chen Q, *et al.* Above-ground biomass estimation of provincial scattered grassland based on Google Earth Engine and machine learning [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2019, **0**(3): 46-52, 75.
- [19] Tian H F, Meng M, Wu M Q, *et al.* Mapping spring canola and spring wheat using Radarsat-2 and Landsat-8 images with Google Earth Engine[J]. *Current Science*, 2019, **116**(2): 291-298.
- [20] Dong J W, Xiao X M, Menarguez M A, *et al.* Mapping paddy rice planting area in northeastern Asia with Landsat 8 images, phenology-based algorithm and Google Earth Engine[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, **185**: 142-154.
- [21] Nguyen U N T, Pham L T H, Dang T D. An automatic water detection approach using Landsat 8 OLI and Google Earth Engine cloud computing to map lakes and reservoirs in New Zealand[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, **191**(4): 235.
- [22] Azzari G, Lobell D B. Landsat-based classification in the cloud: An opportunity for a paradigm shift in land cover monitoring[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, **202**: 64-74.
- [23] Breiman L. Classification and regression tree [M]. Belmont, Calif.: Wadsworth International Group, 1984.
- [24] Tayyebi A, Pijanowski B C. Modeling multiple land use changes using ANN, CART and MARS: comparing tradeoffs in goodness of fit and explanatory power of data mining tools [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, **28**: 102-116.
- [25] Hu Y F, Dong Y, Batunacun. An automatic approach for land-change detection and land updates based on integrated NDVI timing analysis and the CVAPS method with GEE support[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, **146**: 347-359.
- [26] 肖国峰, 朱秀芳, 侯陈瑶, 等. 撂荒耕地的提取与分析——以山东省庆云县和无棣县为例[J]. *地理学报*, 2018, **73**(9): 1658-1673.
- Xiao G F, Zhu X F, Hou C Y, *et al.* Extraction and analysis of abandoned farmland—a case study of Qingyun and Wudi counties in Shandong Province[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, **73**(9): 1658-1673.
- [27] 李恒凯, 吴娇, 王秀丽. 基于 GF-1 影像的东江流域面向对象土地利用分类[J]. *农业工程学报*, 2018, **34**(10): 245-252.
- Li H K, Wu J, Wang X L. Object oriented land use classification of Dongjiang River Basin based on GF-1 image[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, **34**(10): 245-252.
- [28] 于文婧, 刘晓娜, 孙丹峰, 等. 基于 HJ-CCD 数据和决策树法的干旱半干旱灌区土地利用分类[J]. *农业工程学报*, 2016, **32**(2): 212-219.
- Yu W J, Liu X N, Sun D F, *et al.* Land use classification in arid and semi-arid irrigated area based on HJ-CCD data and decision tree method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, **32**(2): 212-219.
- [29] 谢高地, 肖玉, 甄霖, 等. 我国粮食生产的生态服务价值研究[J]. *中国生态农业学报*, 2005, **13**(3): 10-13.
- Xie G D, Xiao Y, Zhen L, *et al.* Study on ecosystem services value of food production in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, **13**(3): 10-13.
- [30] 约日古丽卡斯木, 杨胜天, 孜比布拉·司马义. 新疆艾比湖流域土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, **35**(2): 260-269.
- Kasimu Y, Yang S T, Simayi Z. Impact of land use change on ecosystem service value in Ebinur Lake Basin, Xinjiang [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, **35**(2): 260-269.
- [31] 唐秀美, 刘玉, 刘新卫, 等. 基于格网尺度的区域生态系统服务价值估算与分析[J]. *农业机械学报*, 2017, **48**(4): 149-153, 205.
- Tang X M, Liu Y, Liu X W, *et al.* Estimation and analysis of ecosystem service value based on grid scale[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, **48**(4): 149-153, 205.
- [32] 侯孟阳, 姚顺波, 邓元杰, 等. 格网尺度下延安市生态服务价值时空演变格局与分异特征——基于退耕还林工程的实施背景[J]. *自然资源学报*, 2019, **34**(3): 539-552.
- Hou M Y, Yao S B, Deng Y J, *et al.* Spatial-temporal evolution pattern and differentiation of ecological service value in Yan'an city at the grid scale based on Sloping Land Conversion Program [J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, **34**(3): 539-552.
- [33] 张雪琪, 满苏尔·沙比提, 马国飞. 基于生态系统服务的叶尔羌河平原绿洲生态经济协调发展分析[J]. *环境科学研究*, 2018, **31**(6): 1114-1122.
- Zhang X Q, MANSUR S, Ma G F. Analysis of eco-economic harmonious development in Yarkant River plain oasis based on ecosystem service value [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, **31**(6): 1114-1122.
- [34] Aschonitis V G, Gaglio M, Castaldelli G, *et al.* Criticism on elasticity-sensitivity coefficient for assessing the robustness and sensitivity of ecosystem services values[J]. *Ecosystem Services*, 2016, **20**: 66-68.

CONTENTS

Concentration Characteristics and Assessment of Model-Predicted Results of PM _{2.5} in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, LIU Bing, <i>et al.</i> (5191)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During the Heating Period of 2016-2017 in the Eastern Part of the North China Plain	ZHANG Yi-qin, WANG Jie, GAO Jian, <i>et al.</i> (5202)
Change in Characteristics of Pollution Gas and Water-soluble Ions at Different Development Stages of Haze	WANG Zhen-bin, LIU An-kang, LU Wen, <i>et al.</i> (5213)
Exposure Levels, Sources, and Health Risks of Heavy Metal Components of PM _{2.5} in Housewives in Rural Shanghai	LUO Ran-ran, DAI Hai-xia, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (5224)
Measuring the Condensable Particle Matter from a Stationary Source	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, WANG Gang, <i>et al.</i> (5234)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics of Furniture Manufacturing Enterprises and the Influence on the Atmospheric Environment	ZHANG Jia-mi, ZENG Chun-ling, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (5240)
VOCs Emission Inventory and Impact Range Simulation of Antibiotic Enterprises	ZHU Tao, LÜ Yi-rong, BIAN Wen-jing, <i>et al.</i> (5250)
Effects of Vehicle Emissions on Heavy Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Pollution in Road Dust in Xinxiang	LI Qi-lu, WU Jin-tao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (5258)
Pollution Characteristics and Exposure Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Road Dust, Chengdu	FANG Shu-hong, ZHU He-xiang, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (5265)
Characteristics of Stable Isotopes and Analysis of Water Vapor Sources of Precipitation at the Northern Slope of the Qilian Mountains	ZHANG Bai-juan, LI Zong-xing, WANG Yu, <i>et al.</i> (5272)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Source Water of the Nanjing Reach of the Yangtze River	FENG Meng-juan, ZHANG Qin, SONG Ning-hui, <i>et al.</i> (5286)
Effects of Different Coagulants on Co-manganese Oxides Filter Media for Removing Ammonium and Manganese from Surface Water in Summer and Autumn	CHENG Li-jie, HUNAG Ting-lin, CHENG Ya, <i>et al.</i> (5294)
Disinfection By-products and the Relevant Health Risk in the Water Supply System in H City of Zhejiang Province	LIU Jun-ping, YU Jian-quan, LI Qing-song, <i>et al.</i> (5302)
Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter in Rivers of the Three Gorges Reservoir Area Under the Background of Urbanization	CHEN Zhao-yu, LI Si-yue (5309)
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Natural Rivers of Western Sichuan Plateau	LIU Yan-yang, SUN Hui, LIU Chen, <i>et al.</i> (5318)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses and Runoff in a Typical Purple Soil Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CAO Rui-xia, LIU Jing, DENG Kai-kai, <i>et al.</i> (5330)
Responses of Riverine Phosphorus Exports to Land Use and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, TANG Li, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (5340)
Effects of Land Use Types at Different Spatial Scales on Water Quality in Poyang Lake Wetland	FANG Na, LIU Ling-ling, YOU Qing-hui, <i>et al.</i> (5348)
Environmental Significance of Phosphorus Fractions of Phytoplankton-and Macrophyte-Dominated Zones in Taihu Lake	GENG Xue, WEN Shuai-long, SUN Pei-rong, <i>et al.</i> (5358)
Spatial Distribution and Pollution Evaluation of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Sediments of Zhushan Bay at Taihu Lake	FANG Jia-qi, QI Chuang, ZHANG Xin-hou, <i>et al.</i> (5367)
Effect of Rainfall Intensity on the Content of Nitrogen and Phosphorus Components in Plateau Areas: A Case Study of the Fengyu River Watershed	LI Xiao-hong, LEI Qiu-liang, ZHOU Jiao-gen, <i>et al.</i> (5375)
Water Purification Effect and Saline-alkali Tolerance Improvement Mechanism of <i>Suaeda salsa</i> in the Estuary Area	WU Dan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i> (5384)
Concentration-dependent Accumulation and Translocation of PFASs by Wetland Plant <i>Alisma orientale</i>	WANG Tuan-tuan, LI Bei-bei, WANG Sai, <i>et al.</i> (5394)
Occurrence of Denitrifying Dephosphatation in a Hybrid Constructed Wetland System and Its Stability	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, LI Qing-fei, <i>et al.</i> (5401)
Comparison of the Control of Sedimentary Phosphorus Release Using Zirconium-, Lanthanum-, and Lanthanum/Zirconium-Modified Zeolites as Sediment Amendments	LIU Ting, ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5411)
Effect of Biochar Structure on Adsorption Characteristics of Ammonia Nitrogen	CHEN Mei, WANG Fang, ZHANG De-li, <i>et al.</i> (5421)
Effect of Dissolved Oxygen on Partial Nitrification of Suspended and Attached Growth Systems	WANG Si-yu, LIU Ling-jie, WANG Fen, <i>et al.</i> (5430)
Effects of Different Intermittent Aeration Strategies on the Start-up of SNAD Process	LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i> (5438)
Operational Performance and Microbiological Characteristics of an Iron-Salt Denitrification Reactor in Co-substrate Mode	WANG Ru, LIU Meng-yu, LIU Bing-yin, <i>et al.</i> (5446)
Effect of Step Aeration on a Municipal Sewage Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WEI Zi-qing, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> (5456)
Improvement of the Dewaterability of Excess Activated Sludge with Mixed Yeasts by Degrading Extracellular Polymeric Substances	YU Xin-yi, XIANG Jin-hao, LIU Ying, <i>et al.</i> (5465)
Influence of Land Use Change on Ecosystem Service Value Based on GEE in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 1998 to 2018	LOU Pei-qing, FU Bo-lin, LIN Xing-chen, <i>et al.</i> (5473)
Assessment of Soil Quality in Coastal Tidal Flat Reclamation Areas Based on MDS-TOPSIS Model	XIE Xue-feng, PU Li-jie, ZHU Ming, <i>et al.</i> (5484)
Effect of Increasing Tidewater Inundation on Porewater Geochemistries and CO ₂ and CH ₄ Effluxes in the Tidal Freshwater Marshes of the Minjiang River Estuary, Southeast China	LI Jing, HUANG Jia-fang, LUO Min, <i>et al.</i> (5493)
Methane Emission Characteristics and Its Influencing Factors over Aquaculture Ponds	WANG Jiao, XIAO Wei, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (5503)
Effect of Fertilization on Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in a Sorghum Field	YAN Jun-xia, ZHANG Yuan, JIAO Xiao-yan (5515)
Land Safety Zoning Method in High-Selenium and High-Cadmium Areas	WANG Rui, HOU Wan-ling, LI Yu-tong, <i>et al.</i> (5524)
Remediation Effects of Different Composite Materials on Cadmium-Contaminated Farmland Soil	CHEN Shu-lan, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (5531)
Hydrocalumite Passivation Effect and Mechanism on Heavy Metals in Different Cd-Contaminated Farmland Soils	WU Qiu-mei, LIU Gang, WANG Hui-feng, <i>et al.</i> (5540)
Effects of Different Land Use Types on Microbial Community Diversity in the Shizishan Mining Area	HUANG Jian, ZHU Xu-yan, LU Jin, <i>et al.</i> (5550)
Effects of Conversion of Forest to Arable Land on the Abundance and Structure of the <i>cbbL</i> -Harboring Bacterial Community in Albic Soil of the Hilly Region of Northeast China	WANG Rui, WU Xian, LI Gang, <i>et al.</i> (5561)
Thoughts on and Construction of a Risk Management and Control System for Contaminated Sites in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	CHANG Chun-ying, DONG Min-gang, DENG Yi-rong, <i>et al.</i> (5570)
Visualized Quantitative Research of Soil Pollution in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHANG Ning, ZHANG Sheng, YANG Hai-chao, <i>et al.</i> (5581)
Characteristics and Environmental Impacts of Materials Stored in Municipal Solid Waste Landfills: A Case Study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	MA Shi-jun, ZHOU Chuan-bin, YANG Guang, <i>et al.</i> (5593)
Heavy Metal Contamination and Migration in Correspondence of an Electroplating Site on the Hilly Lands of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China	HOU Wen-juan, GONG Xing, ZHAN Ze-bo, <i>et al.</i> (5604)
Pollution Characteristics and Migration of BTEX at a Chemical Contaminated Site in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DENG Yi-rong, LU Hai-jian, DONG Min-gang, <i>et al.</i> (5615)
Immobilization Impact of Goethite-Fulvic Acid Composites on Pb-Cd Contaminated Soil	LIU Qian-jun, LI Xiang, ZHOU Yang-mei, <i>et al.</i> (5623)
Mobilization of Heavy Metals in a Soil-Plant System and Risk Assessment in the Dabaoshan Mine Area, Guangdong Province, China	CHEN Jie-yi, LIU Guang-bo, CUI Jin-li, <i>et al.</i> (5629)
Calculation of the Soil Risk Control Value through a Hydrus-1D Model for Groundwater Protection	LIN Ting, LUO Fei, ZHU Yan, <i>et al.</i> (5640)
INDEX HUANJING KEXUE CONTENTS 2019, Vol. 40	(5659)