

目次

复合污染条件下人为源 VOCs 的 SOA 生成研究进展	陈天增, 刘俊, 马庆鑫, 楚碧武, 张鹏, 刘永春, 刘昌庚, 贺泓 (1201)
全氟和多氟烷基化合物微生物降解与转化研究进展	孙红文, 方博, 陈浩, 赵茂森, 张耀之, 乔碧汀, 喻蒙 (1214)
湖泊水质参数遥感监测研究进展	王思梦, 秦伯强 (1228)
淡水环境中微塑料与重金属的“木马效应”研究进展	赵伟高, 田一梅, 赵鹏, 赵令铨, 金超 (1244)
长江经济带二氧化碳净排放时空演变特征及脱钩效应	吴一帆, 许杨, 唐洋博, 贾宁, 李玮, 李翀, 殷国栋 (1258)
中国土地利用碳排放变化及协调分区	李缘缘, 魏伟, 周俊菊, 郝瑞军, 陈帝伯 (1267)
基于 STIRPAT 模型天津减污降碳协同效应多维度分析	刘茂辉, 岳亚云, 刘胜楠, 李婧, 刘佳泓, 孙猛 (1277)
基于燃料生命周期的中国铁路排放趋势	佟惠, 范朝阳, 梁晓宇, 孙露娜, 门正宇, 赵肖阳, 毛洪钧 (1287)
浙江省大气颗粒物 PM _{2.5} 化学组分污染特征分析	周菁清, 余磊, 陈书鑫, 陆佳峰, 许亚璐, 季海冰, 张柳芳, 刘劲松, 王静 (1297)
南京亚微米级颗粒物化学组成的季节变化、粒径分布和来源	徐振麒, 尚玥, 丁峰, 谢鸣捷, 王勤耕 (1310)
洛阳地区碳质组分季节特征及来源解析: 棕碳的重要贡献	闫广轩, 侯明阳, 张朴真, 王洁琦, 王虎, 李崇浩, 王跃思 (1319)
江苏省 2019 年 S/IVOCs 排放清单及分布特征	宋童艾, 张佳颖, 关璐, 胡建林, 于兴娜 (1328)
珠三角典型工业区挥发性有机物 (VOCs) 组成特征: 含氧挥发性有机物的重要性	宋鑫, 袁斌, 王思行, 何贤俊, 李小兵, 彭钰雯, 陈钰彬, 齐吉朋, 蔡嘉骅, 黄山, 胡丹, 魏文, 刘可旋, 邵敏 (1336)
2000 ~ 2020 年天津市机动车全过程 VOCs 排放特征及演变	孙露娜, 仲崇智, 孙世达, 刘妍, 佟惠, 吴亚君, 宋鹏飞, 张丽娜, 黄旭, 吴琳, 毛洪钧 (1346)
港口自有移动源大气污染物排放清单	徐小凡, 王宝庆, 吴俊成, 李怡诺 (1357)
基于改进水资源生态足迹模型的中国水资源可持续利用仿真及调控	欧阳兴涛, 廖浩宇, 姜秋香, 王子龙 (1368)
黄河流域入海口典型区域有机磷酸酯分布特征和风险评估	曹渺, 郭昌胜, 张恒, 刘士清, 陈苗, 吕佳佩, 侯嵩, 尤新军, 徐建 (1378)
桂林会仙岩溶湿地水体与沉积物中有机氯农药污染特征	余悦, 邢新丽, 程铖, 刘威杰, 张标, 孔祥胜, 李森, 余海阔, 罗为群, 祁士华 (1387)
广东茂名主要水系表层沉积物重金属风险评估及源解析	陈小霞, 张敏, 李蓓, 温鹏翀, 丁平, 姚玲爱, 马千里, 李廷真, 蔡丹, 胡国成 (1397)
宁波市地表水重金属时空分布特性和健康风险评价	徐美娟, 杨佳, 任晓景, 赵红燕, 高夫燕, 蒋跃军 (1407)
典型西北山地-绿洲系统不同水体水化学特征及其水力关系分析	王诗语, 孙从建, 陈伟, 周思捷, 张鑫 (1416)
牟汶河中上游孔隙水化学特征及控制因素	刘元晴, 周乐, 吕琳, 李伟, 王新峰, 邓启军, 郑一迪, 李常锁 (1429)
石河子-昌吉地区地下水水质时空变化及污染源解析	丁启振, 周金龙, 季彦桢, 杨方源, 张淑霞 (1440)
北方富营养分层型水库藻类季节性暴发机制及其阈值分析	温成成, 黄廷林, 孔昌昊, 张志刚, 田鹏飞 (1452)
拉林河流域底栖硅藻群落结构特征及水生态健康评价	单涛, 袁安龙, 黄子芮, 周静怡, 陆欣鑫, 范亚文 (1465)
南昌市湖泊丰水期浮游细菌群落结构及影响因素	高鹏飞, 王鹏, 黄伟, 丁明军, 张华, 聂明华, 黄高翔 (1475)
调蓄水库细菌群落季节变化特征与影响因素	丁宁, 杨莹莹, 万年新, 徐爱玲, 葛建华, 宋志文 (1484)
典型城市内河细菌群落组成与氮循环功能垂直分布及溯源分析	谭秋阳, 吕金燕, 白献宇, 程莉蓉, 李晓艳, 郭蕾 (1497)
滇中高原水库外源污染负荷贡献解析与环境容量核算	郭玉静, 李红兵, 王树明, 白乙娟, 任良锁, 丁爱中 (1508)
窄孔径含磷棉秆生物质炭的制备及对四环素的吸附机制	曾少毅, 李坤权 (1519)
高比表面疏脲改性花生壳炭的制备及对四环素和铜的吸附	闵炳坤, 李坤权 (1528)
不同供水管材生物膜抗生素抗性基因分布特征	刘晨旭, 白晓慧 (1537)
水蚀环境植被恢复对土壤有机碳固存和团聚体稳定的影响: Meta 分析	杨睿哲, 杨世龙, 翁希哲, 徐灵颖, 刘雪健, 杜运田, 张雪辰, 郑伟, 翟丙年, 王朝辉, 李紫燕 (1542)
增温施肥对稻麦农田土壤有机碳及其活性组分的影响	邓旭哲, 韩晨, 薛利祥, 侯朋福, 薛利红, 杨林章 (1553)
三江源地区高寒草地土壤功能的水平分异特征及其沿发生层的垂直变化	李柏键, 申聪聪, 刘四义, 吴华勇, 王继琛, 赵冬辉, 葛源 (1562)
鄱阳湖平原直播稻 CH ₄ 通量及其与 CO ₂ 通量的综合温室效应	时元智, 崔远来, 时硕, 洪大林, 程婕 (1572)
不同土地利用类型土壤多环芳烃的纵向污染特征及来源解析	周芷嫣, 张秀秀, 王飞, 朱昌达, 潘剑君 (1583)
石家庄道路灰尘中全氟/多氟化合物及其新型替代品的污染特征及健康风险评估	李鹏飞, 王媛, 杨晨, 史亚利, 崔建升 (1593)
南方典型矿区农业小流域耕地土壤重金属空间分布特征及污染评价	杨宇, 郭婷婷, 刘孝利, 铁柏清 (1602)
三峡库区(重庆段)菜地土壤重金属污染特征、潜在生态风险评估及源解析	石雨佳, 方林发, 方标, 叶莘莘, 范晓霞, 高坤鹏, 陈征, 肖然 (1611)
兰州市耕地表层土壤重金属的积累特征及其影响因素分析	康乐, 彭鑫波, 马延龙, 张利瑞, 张妍娥, 王泉灵, 张松林 (1620)
粤北典型工矿区土壤重金属富集特征、来源解析及风险评价	王越, 莫莉, 余新晓, 师华定, 费杨 (1636)
三门峡某铝厂遗留场地土壤重金属空间分布特征及来源解析	卢小慧, 余方中, 范一鸣, 杨阳 (1646)
某试验场土壤重金属分布特征及其污染评价	王诗雨, 李淳, 赵洪伟, 陈希, 张慧君, 朱勇兵, 赵三平, 计超, 刘晓东 (1657)
化学淋洗联合电动技术修复重金属污染土壤的效果及其机制	马强, 卫泽斌, 吴启堂 (1668)
再生铜冶炼过程中重金属排放特征和控制	林炳丞, 吴广龙, 郑明辉, 刘国瑞 (1678)
长江流域(安徽段)土壤-作物系统重金属污染特征及健康风险评价	刘海, 魏伟, 黄健敏, 赵国红 (1686)
稻-麦轮作模式下不同钝化材料对镉污染农田土壤的原位钝化效应	张路, 唐婵, 余海英, 李廷轩, 张锡洲, 黄化刚 (1698)
巯基化蒙脱石用于镉污染农田安全生产的效果及其持久性	冯先翠, 陈亚刚, 焦洪鹏, 曹鹏, 朱凤榕, 李媛媛, 江海燕 (1706)
蚯蚓、秸秆和柠檬酸对少花龙葵与韭菜修复铅镉污染土壤的影响	陈敏妮, 袁小奇, 张金峰, 何川黔, 高波 (1714)
地质高背景区富 Se 耕地可利用性研究及区划建议	王锐, 李瑜, 余京, 周蛟, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (1727)
张家口市北新屯地区蔬菜种植区锆元素富集特征及成因分析	安永龙, 殷秀兰, 金爱芳, 李文娟, 鲁青原 (1735)
三峡库区消落带落叶杉人工林土壤细菌群落结构多样性及动态变化	谭雪, 董智, 张丽苗, 袁中勋, 李昌晓 (1748)
黄土丘陵区退耕还林对土壤真菌群落的影响	张蕾, 王强, 杨新月, 吕俊平 (1758)
化肥减量配施有机肥对土壤功能微生物和柠檬产量及品质的影响	王蕊燕, 熊子怡, 罗东海, 王子芳, 高明 (1768)
鸡粪和猪粪生物发酵过程中抗生素抗性基因的动态变化	张丹, 彭双, 王丹青, 王一鸣, 林先贵 (1780)
牛粪还田对土壤微生物群落特征的影响	张雅丽, 郭晓明, 胡慧, 郭暖, 徐小涛, 李建林 (1792)
《环境科学》征订启事(1406) 《环境科学》征稿简则(1592) 信息(1635, 1667, 1677)	

基于改进水资源生态足迹模型的中国水资源可持续利用仿真及调控

欧阳兴涛, 廖浩宇, 姜秋香*, 王子龙

(东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 针对现有水资源生态足迹模型复杂程度高、适用性不强、系统性和动态性不足的问题, 在模型中引入灰水足迹量化消耗用水, 并在水资源生态足迹指标计算中考虑非常规水源, 然后结合系统动力学仿真技术, 开展中国水资源可持续利用调控研究. 结果表明, 2000~2017年中国对水资源的开发利用程度整体保持在生态承载力以内, 水资源开发仍有潜力, 但水资源的供需却存在不平衡的情况. 鉴于此, 从节流、开源和污染治理角度出发, 设置了6种中国水资源可持续利用调控方案. 其中, 2018~2050年综合协调方案能在满足水资源生态可持续和水资源负载合理的条件下, 妥善解决水资源供需问题, 是实现中国水资源可持续利用的最佳调控方案. 目前中国水资源开发速度滞后, 与社会经济发展对水资源消耗的增长速度不匹配, 需在原有政策的基础上进一步加强开源、节水和治污力度, 从而缓解水资源的生态胁迫压力.

关键词: 水资源生态足迹; 灰水足迹; 消耗用水; 生态承载力; 水资源可持续利用; 系统动力学

中图分类号: X22 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)03-1368-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202204267

Simulation and Regulation of Sustainable Utilization of Water Resources in China Based on Improved Water Resources Ecological Footprint Model

OUYANG Xing-tao, LIAO Hao-yu, JIANG Qiu-xiang*, WANG Zi-long

(School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: The original ecological footprint model of water resources was improved here to explore the rational policy of water resources development and utilization. Aiming to address the problems of high complexity, weak applicability, and insufficient systematicness and dynamics of the existing water resources ecological footprint model, the grey water footprint was introduced into the model to quantify the water for decontamination. In the calculation of the water resources ecological footprint index, the rainwater collection project, seawater desalination, and water resources regeneration, unconventional water sources were considered, and when combined with the system dynamics simulation technology, the SD model of water resources sustainable utilization in China was established. We carried out research on the regulation and control of sustainable utilization of water resources in China. The results showed that the development and utilization of water resources in China remained within the ecological carrying capacity as a whole from 2000 to 2017, and the development of water resources still had potential, but the supply and demand of water resources were unbalanced. Given this, from the perspective of throttling, open-source, and pollution control, six control schemes for sustainable utilization of water resources in China were set up, including the continuation of the current situation, green throttling, pollution control, strict planning for water source development, and comprehensive treatment. Among them, the comprehensive coordination plan for 2018-2050 could properly solve the problem of water resources supply and demand under the conditions of meeting the ecological sustainability of water resources and reasonable water resources load and was the best regulation plan to realize the sustainable utilization of water resources in China. At present, the development of water resources in China lags, which does not match the growth rate of social and economic development on water resources consumption. It is necessary to further strengthen the efforts of open-source, water-saving, and pollution control based on the original policies, so as to alleviate the ecological stress of water resources.

Key words: water resources ecological footprint; grey water footprint; decontamination water; ecological carrying capacity; sustainable utilization of water resources; system dynamics

1992年加拿大学者首次提出生态足迹模型概念^[1], 拉开了生态足迹研究的序幕. 生态足迹 (ecological footprint, EF) 是指满足一定人口需求, 具有生物生产力的土地和水域面积^[2]. 通过生态足迹与生态承载力的对比, 可以判断生态系统处于盈余或赤字状态, 从而制定水资源开发利用的管理策略. 近年来, 随着水资源短缺和水污染问题日益突出^[3], 国际经济全球化与生态文明工程建设战略思想不断发展和深化, 作为衡量水资源可持续利用程度的关键指标, 水资源生态足迹也成为学者关注的热点^[4,5]. 范晓秋^[6]在生态足迹模型的基础上建立水资源账户, 将水资源生态足迹的概念单独引入水资源领域. 刘子刚等^[7]明确了水生态足迹和水生

态承载力的含义, 完善了水资源生态足迹的相关概念. 张乐勤等^[8]和谭秀娟等^[9]使用水资源生态盈亏、水资源生态压力指数和水资源生态赤字等指标对区域水资源开发利用程度进行评估, 进一步推进了水资源生态足迹模型的实际应用.

水资源生态足迹虽在水资源领域应用广泛, 但其理论体系仍需进一步完善. 首先, 针对传统水资源生态足迹模型缺少水污染生态足迹折算的问题, 董

收稿日期: 2022-04-22; 修订日期: 2022-06-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(42071243); 黑龙江省科学基金项目(YQ2020E001)

作者简介: 欧阳兴涛(1998~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水资源高效利用与生态保护, E-mail: ouyangxingtao@126.com

* 通信作者, E-mail: jiangqiuixiang@163.com

立翔^[10]和王刚毅^[11]等学者在改进模型中增加了水环境账户,但该方法需通过对水资源和水环境这 2 个独立账户的同类指标叠加后进行水资源生态足迹评价,导致模型整体复杂程度增加. 水足迹理论中灰水足迹是以污染物浓度和可排放标准为依据,将污染物稀释消纳至环境水质标准所需的水资源量^[12,13]. 因此,将灰水足迹的概念和计算方法引入到水资源生态足迹模型的水资源账户中,能更明确和有效地量化水污染的耗水量(消污用水),避免设置水环境账户的需要,同时降低了模型复杂程度;其次,水资源生态足迹模型对水资源生态承载力的计算大多数情况只考虑地表和地下水资源^[14,15],忽略了人类社会对集雨工程、海水淡化和再生水资源等非常规水源的利用,导致模型的适用性不强;最后,目前基于水资源生态足迹模型的水资源可持续利用研究,大多停留在现状分析和对未来问题的定性考量上^[16,17],缺乏解决问题的定量发展方案,研究的动态性和系统性略显不足.

鉴于此,本文利用系统动力学仿真技术,构建融入灰水足迹的水资源生态足迹、考虑非常规水源的水资源生态承载力、水资源生态压力指数和水资源负载指数的中国水资源可持续利用仿真模型,动态分析水资源开发利用现状,制定和优选中国水资源可持续利用的调控模式,以期后续水资源利用政策的制定提供参考.

1 材料与方法

1.1 水资源生态足迹计算

水资源生态足迹(F_w)用于衡量人类对水资源的利用程度,指在保持人类日常生产和生态等水资源消耗所需的生态生产性水域面积. 传统水资源生态足迹模型设置生产、生活和生态这 3 个用水二级账户^[18],本文在此基础上加入消污用水二级账户,用于折算污染对水资源的消耗,与传统模型相比用水核算账户更加全面,结果更加准确. 在改进水资源生态足迹模型中,生产用水依照产业划分为种植业用水、畜牧业用水和工业用水;生活用水根据城乡用水差异分成城镇居民用水和农村居民用水;生态用水包含城市园林绿地用水和湿地人工补水;消污用水通过灰水足迹计算得出. 改进后的水资源生态足迹计算公式如下:

$$F_P = \frac{\gamma W_P}{P_w} \times N \quad (1)$$

$$F_L = \frac{\gamma W_L}{P_w} \times N \quad (2)$$

$$F_E = \frac{\gamma W_E}{P_w} \times N \quad (3)$$

$$F_S = \frac{\gamma W_S}{P_w} \times N \quad (4)$$

$$F_w = F_P + F_L + F_E + F_S = N \times \gamma \times \left(\frac{W}{P_w} \right) \quad (5)$$

式中, F_P 、 F_L 、 F_E 、 F_S 和 F_w 分别为生产用水生态足迹、生活用水生态足迹、生态用水生态足迹、消污用水生态足迹和水资源生态足迹总量, hm^2 ; W_P 、 W_L 、 W_E 、 W_S 和 W 分别为人均生产用水量、人均生活用水量、人均生态用水量、人均消污用水量和人均用水量, $\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1}$; N 为总人口数,人; γ 为全球水资源平衡因子,其作用是将各类生物生产性土地单位面积生产力转化为可以相互比较的生物生产性面积,由全球水资源生产性土地平均生产力除以全球各类资源生产面积的平均生产力计算得出,取值为 5.19^[19]; P_w 为全球平均水资源生产能力,代表单位面积全球平均水资源生产量,取值为 $3\,140 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[19].

1.2 消污用水生态足迹计算

消污用水生态足迹(F_s)指将污染物稀释消纳至环境水质标准所需的水资源量,本文使用水足迹中灰水足迹表示消污用水. 根据产业不同将消污用水划分为种植业消污用水、畜牧渔业消污用水、工业消污用水和生活消污用水. 计算方法如下:

$$F_{SA} = G_C \times I_C \quad (6)$$

$$F_{SM} = G_M \times I_M \times R_{EC} \quad (7)$$

$$F_{SI} = \frac{EI_{\text{COD}}}{S_{\text{COD}}} \quad (8)$$

$$F_{SL} = \frac{EL_{\text{COD}}}{S_{\text{COD}}} \quad (9)$$

$$F_S = F_{SA} + F_{SM} + F_{SI} + F_{SL} \quad (10)$$

式中, F_{SA} 为种植业消污用水, m^3 ; G_C 为农作物产量, kg ; I_C 为单位产量农作物灰水足迹指标, $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$; F_{SM} 为畜牧渔业消污用水, m^3 ; G_M 为畜牧渔业肉类产量, kg ; I_M 为单位产量肉类灰水足迹指标, $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$; R_{EC} 为扣除肉类养殖所消耗粮食的灰水足迹占畜牧渔业总灰水足迹比例,%; F_{SI} 和 F_{SL} 分别为工业消污用水和生活消污用水, m^3 ; EI_{COD} 和 EL_{COD} 分别为工业 COD 排放量和生活 COD 排放量, kg ; S_{COD} 为排放水体中 COD 的标准浓度,依据《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)^[20],此处取Ⅲ类水中 COD 的标准浓度 $0.02 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

1.3 水资源生态承载力计算

水资源生态承载力(C_w)表示在一定的经济规模和人口条件下,满足维持水资源消费和消纳水污染所必需的水资源生态足迹供给量^[21]. 针对现有水资源生态承载力计算中未考虑非常规水源,本文将

集雨工程、海水淡化、中水回用和工业重复利用的水量融入到水资源生态承载力计算中.改进水资源生态承载力计算公式如下:

$$C_w = Q_c \times \gamma \times \varphi / P_w \quad (11)$$

$$Q_c = 0.4 \times (Q_N + Q_0) \quad (12)$$

式中, C_w 为水资源生态承载力, hm^2 ; Q_c 为综合水资源总量, m^3 ; φ 为水资源产量因子, 由于同类生物生产性土地的生产力在不同地区之间存在差异, 故加入水资源产量因子进行数据的可比较性调整, 取值为 0.94^[2]; 0.4 为世界环境和发展委员会建议计算水资源生态承载力时, 扣除用于生态和生物多样性补偿面积后可用水资源的比例^[22]; Q_N 为自然资源总量, 包括地表水和地下水资源, m^3 ; Q_0 为其他水资源总量, 包括集雨工程、海水淡化、中水回用和工业水重复利用的水量, m^3 .

1.4 水资源可持续利用评价指标计算

水资源可持续利用问题的根源在于水资源存在供需矛盾^[23], 水资源供需关系与水资源可持续利用模型中各关键参数有密切关系, 贯穿水资源可持续仿真的全过程, 其中最关键的参数为水资源生态足迹和水资源生态承载力. 因此, 本文在水资源供需关系的基础上, 以水资源开发利用程度和开发潜力等作为突破口, 选取水资源生态盈余或赤字、万元 GDP 水资源生态足迹、水资源生态压力指数和水资源负载指数作为水资源可持续利用的评价指标.

1.4.1 水资源生态盈余或赤字

水资源生态盈余 (S_w) 表示水资源储量与水资源利用量的关系, 通常采用水资源生态承载力与水资源生态足迹的差值表示^[24]. 计算公式如下:

$$S_w = C_w - F_w \quad (13)$$

$S_w > 0$ 时, 说明水资源开发利用存在生态盈余, 有继续开发的潜力; $S_w < 0$ 时, 说明存在生态赤字, 水资源开发利用过度; 当 $S_w = 0$ 时, 说明水资源开发利用与储量协调平衡, 处于临界状态.

1.4.2 万元 GDP 水资源生态足迹

万元 GDP 水资源生态足迹 (P_G) 表示区域的水效益, 该值越大表明水资源利用效益越高^[25]. 计算公式如下:

$$P_G = F_w / G \quad (14)$$

式中, G 为国内生产总值, 亿元.

1.4.3 水资源生态压力指数

水资源生态压力指数 (P_{w1}) 用于衡量水资源生态安全性, 该值越大说明水资源安全受到的威胁越大. 若 $0 < P_{w1} < 1$, 则表示水资源开发利用处于安全状态且仍有进一步开发空间; 若 $P_{w1} = 1$, 则表示水资源开发利用达到了最大值, 水资源仍处于安全状

态; 若 $P_{w1} > 1$, 则表示水资源消耗量大于水资源可开发利用的最大值, 水资源处于不安全状态^[19]. 计算公式如下:

$$P_{w1} = F_w / C_w \quad (15)$$

1.4.4 水资源负载指数

水资源负载指数 (C) 是对经济条件和自然状况存在差异的不同地区或者同一地区不同时间进行水资源开发潜力评价的指标, 反映人类社会和水资源的复杂关系^[26]. 目前, 水资源负载指数仅考虑受降雨、GDP、人口和水资源量的影响^[27], 而未考虑水资源利用情况, 将导致水资源负载指数的适用性降低. 本文将表征水资源开发利用程度的水资源生态压力指数引入水资源负载指数计算中, 以此提高水资源负载指数的适用性. 计算公式如下:

$$C = \frac{k \sqrt{N \times G}}{Q_c} \times \beta \times (1 - P_{w1}) \quad (16)$$

式中, k 为与降水有关的系数, 计算公式见表 1; β 为调参系数, 取值为 0.2^[28].

表 1 系数 k 的计算方法

降水量/mm	k 值计算公式
$R \leq 200$	1
$200 < R \leq 400$	$1.0 - [0.1(R - 200)/200]$
$400 < R \leq 800$	$0.9 - [0.2(R - 400)/400]$
$800 < R \leq 1600$	$0.7 - [0.2(R - 800)/800]$
$R > 1600$	0.5

水资源负载指数表征特定区域内水资源所能够负载的人口和经济体量, 显示特定区域人口数量和经济发展的同水资源之间的联系, 可将其划分为 5 个等级^[27] (见表 2).

表 2 水资源负载指数分级标准和含义

等级	水资源负载指数	含义	
		水资源利用程度	水资源开发潜力
I	$C > 10$	很高	很小
II	$5 < C \leq 10$	较高	较小
III	$2 < C \leq 5$	中等	中等
IV	$1 < C \leq 2$	较低	较大
V	$C \leq 1$	很低	很大

1.5 中国水资源可持续利用 SD 模型建立和检验

本文利用 Vensim 软件构建基于改进生态足迹的中国水资源可持续利用 SD 模型, 同时引入水资源生态足迹、水资源生态承载力、水资源生态盈余和水资源生态压力指数等作为分析水资源开发利用的关键指标. 模型时间边界为 2000 ~ 2050 年, 步长为 1 a, 其中 2000 ~ 2016 年为历史年, 2017 年为现状年, 2018 ~ 2050 为规划年, 空间边界为中国境内

地区(中国香港、澳门特别行政区和台湾省资料暂缺). 中国水资源可持续利用 SD 模型由水资源可持续利用子系统和消污用水子系统组成(图 1~2), 其中种植业消污用水、工业生活消污用水和畜牧渔业消污用水是连接 2 个子系统的关键变量。

本文采用历史检验法检验模型仿真结果的准确

性, 选取生活用水量、工业用水量和农牧渔业用水量这 3 个关键变量进行验证. 经对比验证, 中国水资源可持续利用 SD 模型各关键变量的仿真值和历史实际值的误差均在 10% 以内, 相对误差较小, 模型仿真结果与现实吻合, 可用于中国水资源可持续利用的相关研究。

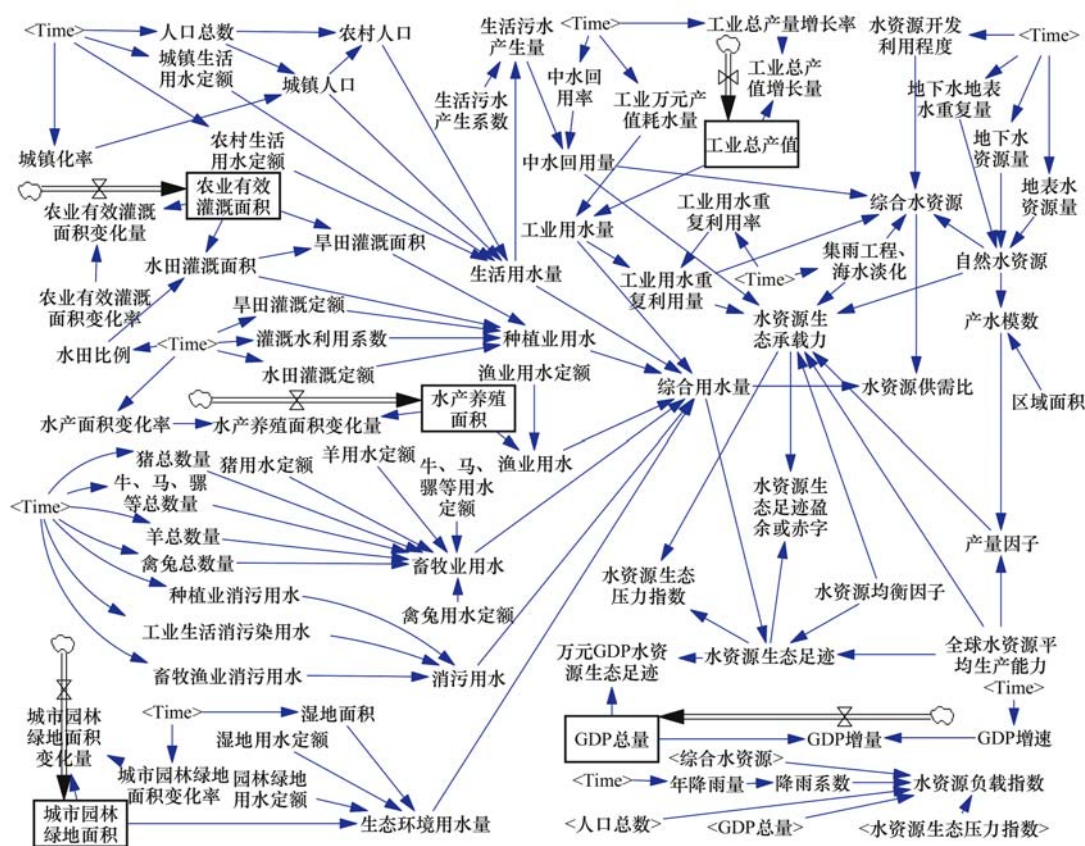


图 1 水资源可持续利用子系统

Fig. 1 Water resources sustainable utilization subsystem

1.6 数据来源

本文建立的中国水资源可持续利用 SD 模型所需的变量数据均来源于统计数据^[29~32], 规划年对未来水资源开发方案模型仿真中的相关数据则参考中国发展规划^[33~36], 人口数据参考赵英辰^[37]的研究成果, 农牧渔业灰水足迹计算所需数据参考国内外相关学者研究成果^[38~40]. 模型参数初始值和预测值以社会经济发展规律为基础, 针对各个用水部门对水资源需求的可持续发展目标, 参考发达国家相关参数水平的同时, 依据中国人口增长、经济发展、科技水平、水资源开发利用、农艺技术和节水技术等相互作用的变化结果, 采用指标分析、数值拟合和定额法确定。

2 结果与讨论

2.1 中国水资源可持续利用现状仿真

由中国水资源可持续利用系统仿真结果可知,

2000~2017 年中国水资源生态足迹和生态承载力呈现缓慢平稳上升趋势[见图 3(a)]; 同时, 水资源生态压力指数呈现波动下降的趋势[见图 3(b)]. 综合分析, 由于 2009~2010 年中国遭遇特大旱情^[41], 导致水资源生态足迹略微超过水资源生态承载力, 出现生态赤字和水资源生态压力指数大于 1 的现象; 其余年份水资源开发利用程度均在生态承载力范围内, 存在生态盈余, 水资源生态压力指数在 0.54~0.92 范围内波动变化. 由此可知: 2000~2017 年中国的水资源开发利用整体处于合理状态, 水资源管理和污水治理监管体系日渐完善, 海水淡化、雨水资源化和循环水等新型水源的利用能力提升显著^[42], 有效缓解了水资源开发利用的压力, 逐渐降低了水资源开发对生态环境的胁迫。

与 2000 年相比, 2017 年中国万元 GDP 水资源生态足迹从 0.011 94 hm^2 持续下降至 0.001 62 hm^2 , 降幅达到了 86.26%, 水资源利用效率增加[见图 3

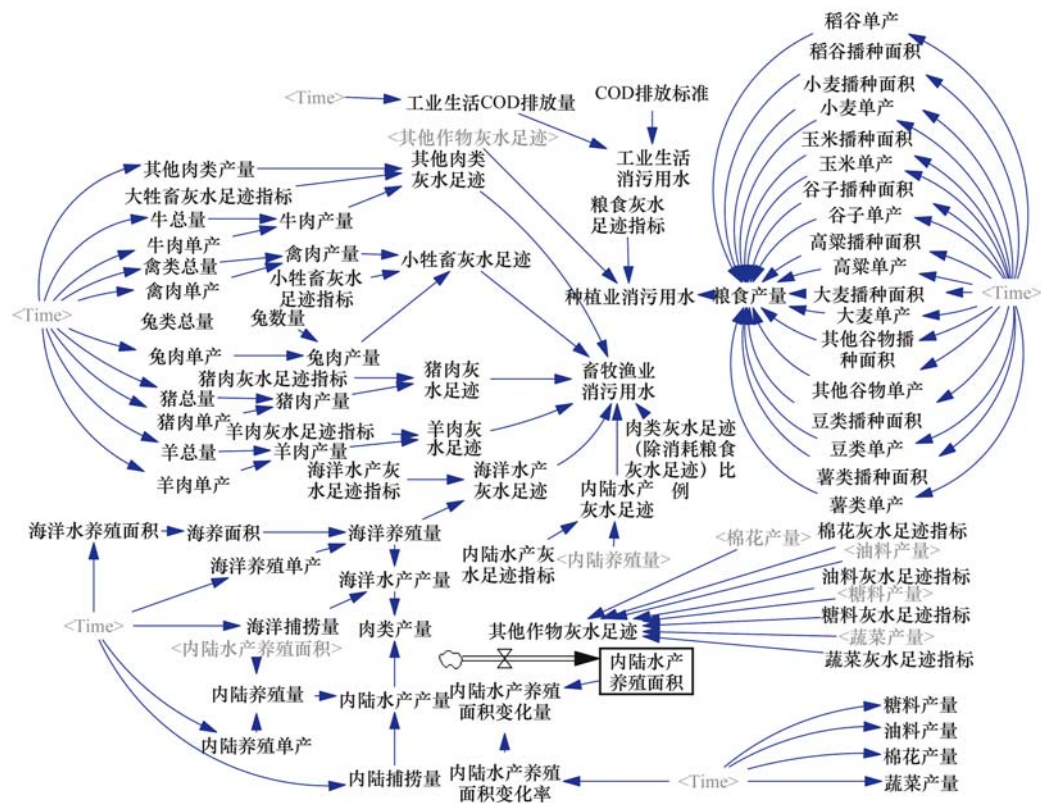


图2 消污用水子系统
Fig. 2 Decontamination water subsystem

(c)]. 由于旱情影响,中国水资源负载指数于2009年和2011年出现两次峰值,其中2011年水资源负载指数达到最大峰值5.99. 整体来看,中国水资源负载指数虽呈波动上升趋势,但水资源负载指数仍处于Ⅲ级(除2011年外),水资源利用程度和开发潜力均为中等[见图3(c)]. 2000~2017年中国的水资源供需比从0.85波动增长至0.90,水资源供需缺口呈现减小趋势. 中国的水资源总量丰富,但人均水资源并不富裕,仅仅占世界平均水平的1/4. 受自然条件、经济社会发展以及全球气候变化的综合影响,中国依然面临着水资源供需矛盾的问题.

2.2 中国水资源可持续利用调控

为寻找解决中国水资源供需矛盾,规避未来可能出现的水安全问题,实现水资源可持续利用的调控方案,本文选择:生活用水量、工业用水量、水资源开发利用程度、工业用水重复利用率、中水回用率、灌溉水利用系数、水田灌溉定额、旱田灌溉定额、渔业用水定额、消污用水、集雨工程和海水淡化的水量这11个指标作为调控变量,设置6种中国水资源可持续利用调控方案.

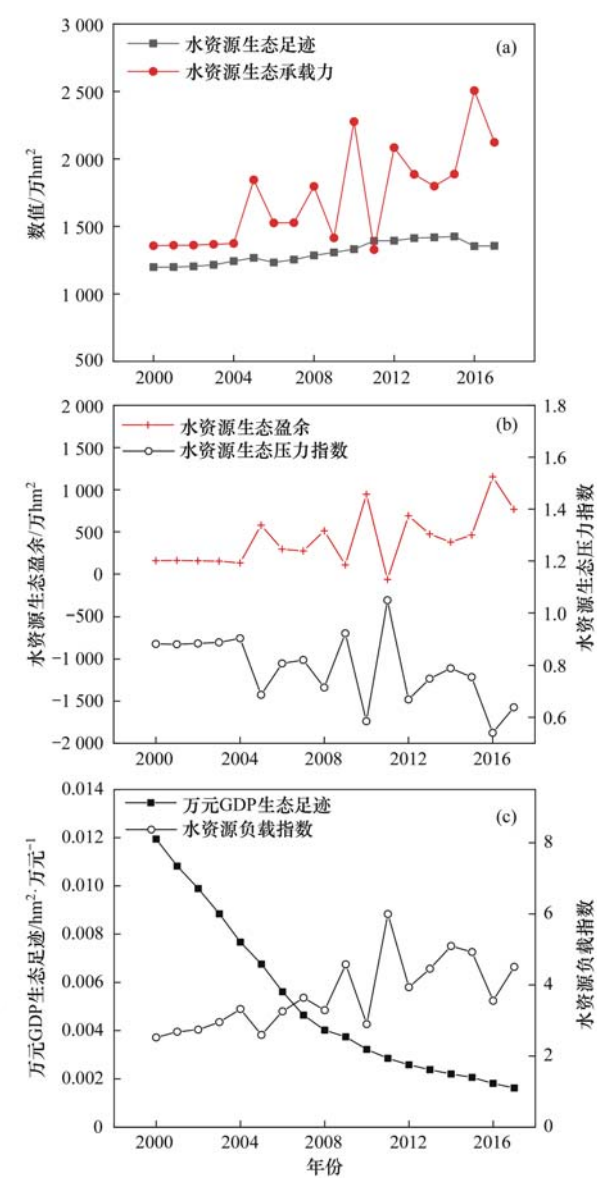
(1)现状延续方案 模型中所有调控变量在不同规划水平年均保持2017年数值不变(见表3),该方案是其他水资源可持续利用调控方案的对照方案.

表3 现状延续方案变量调控

Table 3 Status quo continuation scheme variable regulation	
调控变量	变量数值
水资源开发利用程度/%	21.012
工业用水重复利用率/%	75.85
中水回用率/%	17
灌溉水利用系数	0.53
水田灌溉定额/ $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$	5245.85
旱田灌溉定额/ $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$	576
渔业用水定额/ $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$	22000
消污用水/亿 m^3	2129.4
集雨工程和海水淡化的水量/亿 m^3	56.8
生活用水量/亿 m^3	832.9
工业用水量/亿 m^3	1280.2

(2)严格规划方案 按照文献[33,35,36]对水资源开发利用和调控变量的相关规划,对现状延续发展方案下超出规划的部分进行制约,使水资源的供给和消耗达到规划要求. 严格规划方案变量调控参数见表4.

(3)绿色节水方案 在保证水资源不过度支出的前提下,一方面通过对工农业节水技术和农艺技术的发展,进一步降低农业用水和工业用水,充分发掘节水潜力. 依据文献[43]和参考世界先进节水技术,在严格规划方案基础上,通过每年提高灌溉水利用系数0.001,降低水田、旱田灌溉定额和渔业用水定额的0.3%,降低工业用水量的0.3%,以此实现工



(a)水资源生态盈余和水资源生态压力指数仿真,(b)水资源生态足迹和水资源生态承载力仿真,(c)万元 GDP 水资源生态足迹和水资源负载指数仿真

图3 中国水资源可持续利用系统仿真结果
Fig. 3 Simulation results of water resources sustainable utilization system in China

业和农业的节水;另一方面通过宣传教育,提高居民节水意识,降低生活中对水资源的消耗,在严格规划方案基础上,通过每年降低生活用水量的0.3%,实现生活节水.绿色节水方案变量调控参数见表5.

(4)水源开发方案 在保证水资源可持续开发利用的条件下,提高水资源开发利用程度,着力加强对集雨工程和海水淡化等新型水源的开发.除此之外,继续加大对循环水资源(包括工业用水重复利用和中水回用水资源)的科研投入,提高用水效率.参考我国水资源开发和非常规水源利用水平较高城市北京的现状^[44],在严格规划方案基础上,每年集雨工程和海水淡化水量提高3%,水资源开发利用

程度增加0.1%,工业用水重复利用率和中水回用率均提高0.3%,以此加大水资源供给量.水源开发方案变量调控参数见表6.

表4 严格规划方案变量调控

调控变量	不同规划水平年变量数值		
	2030 年	2040 年	2050 年
水资源开发利用程度/%	21.973	21.973	21.973
工业用水重复利用率/%	81.43	85.71	90
中水回用率/%	30	35	40
灌溉水利用系数	0.6	0.64	0.68
水田灌溉定额/ $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$	5 153.85	5 083.08	5 012.31
旱田灌溉定额/ $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$	550	520	500
渔业用水定额/ $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$	22 000	22 000	22 000
消污水/亿 m^3	2 464.4	2 716.5	2 909.6
集雨工程和海水淡化的水量/亿 m^3	94.8	124.1	153.3
生活用水量/亿 m^3	965.3	965.9	891.83
工业用水量/亿 m^3	1 705.7	1 667.3	1 608.48

表5 绿色节水方案变量调控

调控变量	不同规划水平年变量数值		
	2030 年	2040 年	2050 年
灌溉水利用系数	0.613	0.663	0.713
水田灌溉定额/ $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$	4 952.85	4 732.35	4 516.09
旱田灌溉定额/ $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$	528.55	484.12	450.5
渔业用水定额/ $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$	21 142	20 482	19 822
生活用水量/亿 m^3	927.65	899.25	803.54
工业用水量/亿 m^3	1 639.18	1 552.26	1 449.24

表6 水源开发方案变量调控

调控变量	不同规划水平年变量数值		
	2030 年	2040 年	2050 年
水资源开发利用程度/%	23.273	24.273	25.273
工业用水重复利用率/%	85.33	92.61	99.9
中水回用率/%	33.9	41.9	49.9
集雨工程和海水淡化的水量/亿 m^3	131.772	209.729	305.067

(5)污染治理方案 依据“十四五”污染防治规划^[45],在严格规划方案基础上,每年消污水降低1.5%.污染治理方案变量调控参数见表7.

表7 污染治理方案变量调控

调控变量	不同规划水平年变量数值		
	2030 年	2040 年	2050 年
消污水/亿 m^3	1 983.8	1 779.3	1 469.3

(6)综合协调方案 综合以上绿色节水、水源开发和污染治理方案的发展模式.

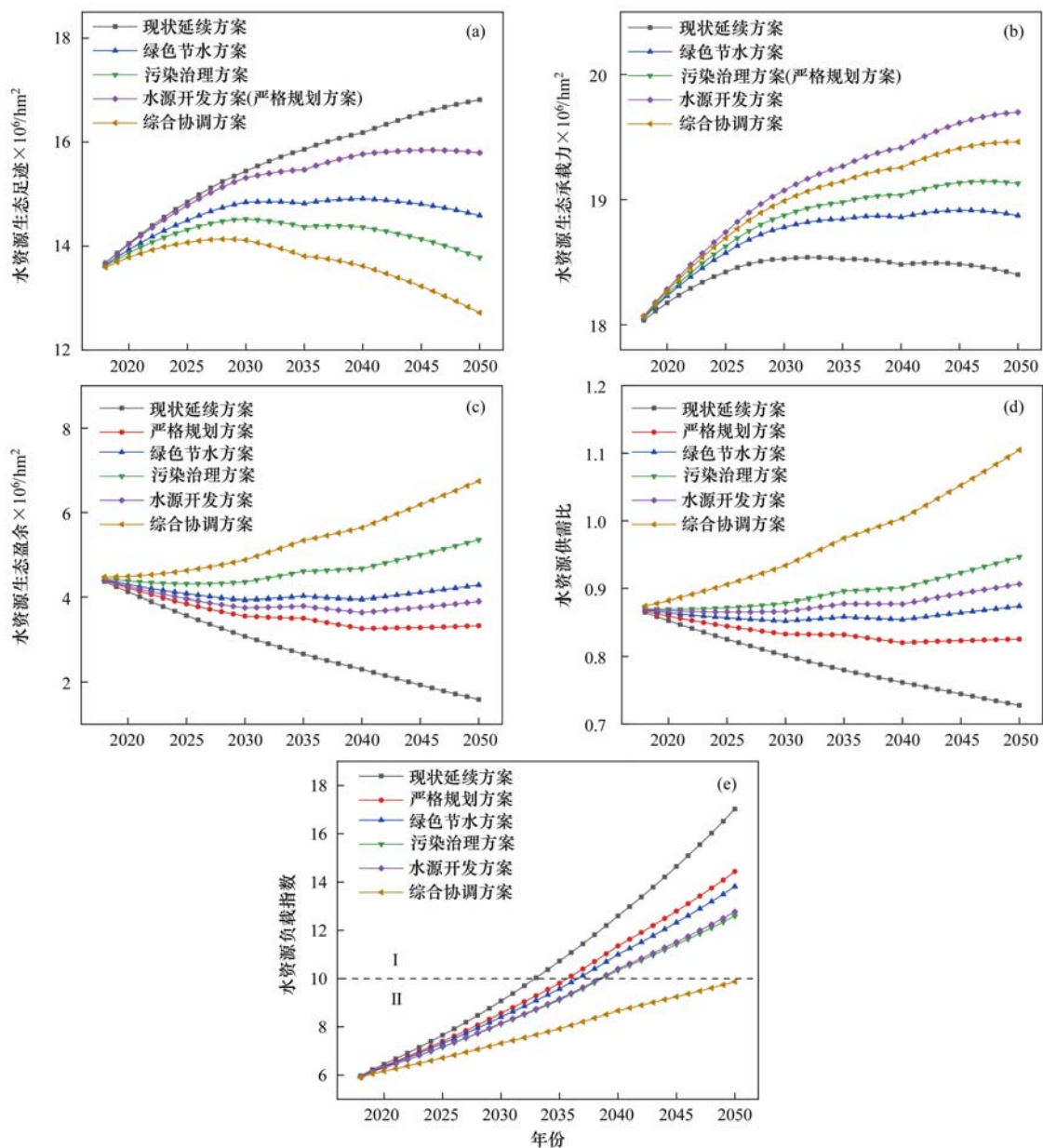
本文将6种调控方案的变量数值输入中国水资源可持续利用系统仿真模型中,通过对不同调控方案进行仿真和优劣对比,优选出可解决中国水资源供需矛盾、规避水安全问题和实现水资源可持续开

发利用的最佳调控方案。

由严格规划方案下各指标的动态仿真结果可以看出,若严格执行规划,未来中国水资源生态足迹和水资源生态承载力均呈现上涨趋势,且前者增速更快[见图4(a)和4(b)].该变化将导致水资源生态盈余日渐下降[见图4(c)],人类社会对水资源生态的胁迫日渐加剧,同时,水资源的供需缺口也将略微增大[见图4(d)].与现状延续方案相比,严格规划方案的水资源生态足迹增长速度更慢、水资源生态承载力提升速度更快,因此,严格规划方案的水资源生态盈余下降速度低于现状延续方案.水资源生态胁迫和水资源供需短缺问题愈发严重[见图4(e)]

和4(d)].综上所述,与现状延续方案相比,严格规划方案对缓解水资源供需短缺和水资源生态胁迫压力有显著作用,但仍旧存在和未来社会发展不匹配的问题。

绿色节水 and 污染治理方案能够有效地降低中国水资源需求量和水资源生态足迹,进而提高水资源供需比和水资源生态盈余.水源开发方案通过适当加大自然水资源的开发程度,加强对循环水、集雨工程和海水淡化等其它水资源开发利用的程度,能够有效弥补水资源供需不平衡的缺口、提升水资源生态承载力[见图4(a)、4(b)和4(c)].相较于严格规划方案,绿色节水、水源开发和污染治理的发



(a) 水资源生态足迹仿真,其中水源开发方案和严格规划方案的仿真数据相同,(b) 水资源生态承载力仿真,其中污染治理方案和严格规划方案的仿真数据相同,(c) 水资源生态盈余仿真,(d) 水资源供需比仿真,(e) 水资源负载指数仿真

图4 调控方案仿真结果

Fig. 4 Simulation results of regulation scheme

展模式虽然能缓解水资源供需矛盾,增加水资源生态盈余,进而提高水资源开发利用的可持续性,但水资源供需比仅保持在 0.85 ~ 0.95 之间[见图 4(d)],并未完全解决水资源供需不平衡的问题,随着时间的推移,甚至还出现了供需矛盾恶化的情况。

由图 4(e)可知,随着中国经济发展和社会进步,水资源负载指数在 5.89 ~ 17.03 之间呈现上升趋势。模拟结果显示:现状延续、严格规划、绿色节水、污染治理和水源开发方案的水资源负载指数分别于 2033、2036、2037 和 2039 年从Ⅱ级变成Ⅰ级,之后中国的水资源呈现出利用程度很高和开发潜力很小的特点,需进一步加大节水力度和提高非常规水源的开发程度,以此缓解水资源短缺的问题。综合协调方案的水资源负载指数则由 5.89 增长到 9.87,虽呈上升趋势,但仍处于Ⅱ级,中国水资源呈现利用程度较高和开发潜力较小的特点,水资源开发利用模式相对合理;同时,该方案水资源生态盈余最高,且水资源供需比呈现稳步增长态势,水资源供需缺口逐渐减小,于 2040 年达到水资源供需平衡[图 4(c)和图 4(d)]。因此,综合协调方案能在满足水资源可持续利用和水资源负载合理的条件下,消除水资源供需缺口,是中国水资源可持续利用的最佳调控方案。

3 结论

(1)在水资源管理、污水治理和新型水源利用的能力提升下,2000 ~ 2017 年中国水资源生态压力指数波动下降,生态胁迫逐渐减小。与此同时,万元 GDP 水资源生态足迹的大幅下降也显示中国节水技术正在日益进步,水资源利用效率逐步上升。水资源负载指数整体处于Ⅲ级,水资源利用程度中等,仍有开发潜力。中国水资源一直存在需求大于供给的问题,虽历史年供需缺口呈现出缩小趋势,但在经济社会发展和全球气候变化的双向驱动下,中国水资源的供需矛盾势必加剧。

(2)为了寻找解决水资源供需矛盾的有效措施,本文从节流、开源和污染治理等角度出发,设置了 6 种水资源可持续利用调控方案。经比较,2018 ~ 2050 年综合协调方案下水资源生态胁迫最低,且在满足水资源生态可持续和水资源负载合理的同时,能妥善解决水资源供需矛盾和水安全问题,是实现中国水资源可持续性利用和解决水资源供需矛盾的最佳调控方案。

(3)依据综合协调方案变量调控特征,我国需进一步提高居民节水意识、节水技术和用水效率,推进节水型社会建设。加强对雨水利用和海水淡化

等新型水源的开发力度,在水资源合理开发的前提下保障供水安全。同时需加强水污染防治,促进水生生态文明建设,以实现水资源的可持续利用。

参考文献:

- [1] van der Voet E. Books: our ecological footprint: reducing human impact on the earth[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 1999, 3(2-3): 185-187.
- [2] 中国环境与发展国际合作委员会,世界自然基金会. 中国生态足迹报告(上)[J]. *世界环境*, 2008, 25(5): 52-57.
- [3] 张凯,吴凤平,成长春. 三重属性的承载力约束下中国水资源利用效率动态演进特征分析[J]. *环境科学*, 2021, 42(12): 5757-5767.
- [4] Zhang K, Wu F P, Cheng C C. Dynamic evolution characteristics of water resources utilization efficiency in China under the constraint of triple attribute carrying capacity[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(12): 5757-5767.
- [5] 刘森. 岷江上游地区景观格局与生态承载力变化及预测研究[D]. 沈阳:中国科学院沈阳应用生态研究所, 2007.
- [6] 韩丽红,潘玉君,马佳伸,等. 云南省水资源生态足迹的时空演化特征分析[J]. *人民珠江*, 2021, 42(4): 28-34.
- [7] Han L H, Pan Y J, Ma J S, et al. Analysis of the spatial-temporal evolution of ecological footprint of water resources in Yunnan province[J]. *Pearl River*, 2021, 42(4): 28-34.
- [8] 范晓秋. 水资源生态足迹研究与应用[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [9] 刘子刚,郑瑜. 基于生态足迹法的区域水生态承载力研究——以浙江省湖州市为例[J]. *资源科学*, 2011, 33(6): 1083-1088.
- [10] Liu Z G, Zheng Y. Evaluation of water ecological carrying capacity based on ecological footprint theory: a case study of Huzhou[J]. *Resources Science*, 2011, 33(6): 1083-1088.
- [11] 张乐勤,方宇媛. 基于空间自相关分析的安徽省水资源生态压力空间格局探析[J]. *水资源保护*, 2017, 33(1): 24-29.
- [12] Zhang L Q, Fang Y Y. Study of spatial pattern of water resources ecological pressure in Anhui province based on spatial autocorrelation analysis[J]. *Water Resources Protection*, 2017, 33(1): 24-29.
- [13] 谭秀娟,郑钦玉. 我国水资源生态足迹分析与预测[J]. *生态学报*, 2009, 29(7): 3559-3568.
- [14] Tan X J, Zheng Q Y. Dynamic analysis and forecast of water resources ecological footprint in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(7): 3559-3568.
- [15] 董立翔,叶永波,顾毅. 基于改进模型的台州市水资源生态足迹与生态承载力的时空分析[J]. *人民珠江*, 2018, 39(12): 116-123.
- [16] Dong L X, Ye Y B, Gu Y. Spatio-temporal analysis of ecological footprint and ecological carrying capacity of Taizhou water resources based on improved model[J]. *Pearl River*, 2018, 39(12): 116-123.
- [17] 王刚毅,刘杰. 基于改进水生态足迹的水资源环境与经济发展协调性评价——以中原城市群为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(1): 80-90.
- [18] Wang G Y, Liu J. Coordinating evaluation of water resources environment and economic development based on improved water ecological footprint: a case study of central plains urban agglomeration[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(1): 80-90.
- [19] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, et al. The water footprint assessment manual: setting the global standard[M]. London: Earthscan, 2011.

- [13] 操信春, 刘喆, 吴梦洋, 等. 水足迹分析中国耕地水资源短缺时空格局及驱动机制[J]. 农业工程学报, 2019, **35**(18): 94-100.
- Cao X C, Liu Z, Wu M Y, *et al.* Temporal-spatial distribution and driving mechanism of arable land water scarcity index in China from water footprint perspective[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, **35**(18): 94-100.
- [14] 井沛然, 郭利丹. 基于生态足迹的浙江省水资源利用与经济发展研究[J]. 水利水电技术, 2021, **52**(6): 42-51.
- Jing P R, Guo L D. Coordinated development between water resources utilization and economy in Zhejiang province based on ecological footprint theory[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, **52**(6): 42-51.
- [15] 安慧, 范历娟, 吴海林, 等. 基于BP神经网络的淮河流域水生态足迹分析与预测[J]. 长江流域资源与环境, 2021, **30**(5): 1076-1087.
- An H, Fan L J, Wu H L, *et al.* Analysis and prediction of water ecological footprint of Huaihe River basin based on BP neural network[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, **30**(5): 1076-1087.
- [16] 朱彤, 付桂军. 呼包鄂榆城市群水资源生态足迹的时空变化及可持续利用评价[J]. 内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版), 2022, **51**(1): 16-23.
- Zhu T, Fu G J. Analysis on spatial and temporal evolution and sustainable utilization of water resource of Hohhot-Baotou-Ordos-Yulin urban agglomeration based on ecological footprint model[J]. Journal of Inner Mongolia Normal University (Natural Science Edition), 2022, **51**(1): 16-23.
- [17] 杜轶, 郭青霞, 张勇. 2种不同算法的水资源生态足迹动态比较分析——以山西省为例[J]. 水土保持学报, 2021, **35**(4): 165-171.
- Du Y, Guo Q X, Zhang Y. Dynamic comparative analysis of water resources ecological footprint based on two different algorithms—Taking Shanxi province as an example[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, **35**(4): 165-171.
- [18] 李玉平, 王晓妍, 朱琛, 等. 邢台市水资源生态足迹核算与预测研究[J]. 水土保持研究, 2014, **21**(3): 227-230.
- Li Y P, Wang X Y, Zhu C, *et al.* Research for calculation and prediction of water resource ecological footprint in Xingtai city, Hebei province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, **21**(3): 227-230.
- [19] 张倩, 谢世友. 基于水生态足迹模型的重庆市水资源可持续利用分析与评价[J]. 灌溉排水学报, 2019, **38**(2): 93-100.
- Zhang Q, Xie S Y. Using ecological water footprint model to analyze sustainable use of water resources in Chongqing[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, **38**(2): 93-100.
- [20] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
- [21] 王俭, 张朝星, 于英谭, 等. 城市水资源生态足迹核算模型及应用——以沈阳市为例[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(8): 2257-2262.
- Wang J, Zhang C X, Yu Y T, *et al.* Calculation model of urban water resources ecological footprint and its application: a case study in Shenyang City of Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, **23**(8): 2257-2262.
- [22] 岳晨, 钱永, 崔向向, 等. 福建省2010-2019年水资源生态足迹与生态承载力[J]. 水土保持通报, 2021, **41**(6): 282-287.
- Yue C, Qian Y, Cui X X, *et al.* Ecological footprint and ecological carrying capacity of water resources in Fujian province during 2010-2019[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, **41**(6): 282-287.
- [23] 高洁, 吴普特, 谢朋轩, 等. 灌区蓝绿水资源与作物生产水足迹多时空分布量化分析[J]. 农业工程学报, 2021, **37**(5): 105-112.
- Gao J, Wu P T, Xie P X, *et al.* Distributed quantification of blue and green water resources and water footprint of crop production in an irrigation district at multiple temporal scales[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, **37**(5): 105-112.
- [24] 李菲, 张小平. 甘肃省水资源生态足迹和生态承载力时空特征[J]. 干旱区地理, 2020, **43**(6): 1486-1495.
- Li F, Zhang X P. Spatio-temporal characteristics of ecological footprint and ecological carrying capacity of water resources in Gansu province[J]. Arid Land Geography, 2020, **43**(6): 1486-1495.
- [25] Li H, Zhao F, Li C H, *et al.* An improved ecological footprint method for water resources utilization assessment in the cities[J]. Water, 2020, **12**(2), doi: 10.3390/w12020503.
- [26] 张丹, 封志明, 刘登伟. 基于负载指数的中国水资源三级流域分区开发潜力评价[J]. 资源科学, 2008, **30**(10): 1471-1477.
- Zhang D, Feng Z M, Liu D W. Evaluation of water resource in third-order basins in China based on carrying capacity[J]. Resources Science, 2008, **30**(10): 1471-1477.
- [27] 李丽, 刘诗奇, 王平, 等. 基于负载指数的中蒙俄经济走廊水资源开发潜力评价[J]. 干旱区研究, 2021, **38**(4): 910-918.
- Li L, Liu S Q, Wang P, *et al.* Evaluation of water resource exploration potential of the China-Mongolia-Russia economic corridor based on carrying capacity[J]. Arid Zone Research, 2021, **38**(4): 910-918.
- [28] Zhang H, Jin G, Yu Y. Review of river basin water resource management in China[J]. Water, 2018, **10**(4), doi: 10.3390/w10040425.
- [29] Forrester J W. System dynamics - the next fifty years[J]. System Dynamics Review, 2007, **23**(2-3): 359-370.
- [30] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴 2017[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [31] 李文龙, 魏巍, 宋瑜, 等. 基于能值生态足迹与灰色预测模型的西藏可持续性评价[J]. 草地学报, 2019, **27**(3): 702-710.
- Li W L, Wei W, Song Y, *et al.* Sustainable development of Tibet based on emergy ecological footprint model[J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, **27**(3): 702-710.
- [32] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报 2017[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.
- [33] 魏际刚. 中国产业中长期发展战略问题[J]. 发展研究, 2014, **30**(9): 4-7.
- [34] 刘京纪. 重点流域水污染防治规划(2011—2015年)出台[J]. 中国水利, 2012, **62**(10): 76.
- [35] 农业部国家发展改革委科技部, 财政部国土资源部环境保护部, 水利部国家林业局. 关于印发《全国农业可持续发展规划(2015-2030年)》的通知[EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/gk/ghjh_1/201505/t20150527_4620031.htm, 2015-05-20.
- [36] 国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要(摘编)[N]. 人民日报, 2016-03-06(010).
- [37] 赵英辰. 全面二孩政策下我国人口结构预测研究[D]. 长春: 吉林财经大学, 2018. 19-36.
- [38] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. The green, blue and grey water footprint of farm animals and animal products[R]. Delft,

- Netherlands: Unesco-IHE Institute for Water Education, 2011.
- [39] 吴普特, 王玉宝, 赵西宁. 2010 中国粮食生产水足迹与区域虚拟水流动报告[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [40] Hoekstra A Y, Chapagain A K. Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern [J]. *Water Resources Management*, 2007, **21**(1): 35-48.
- [41] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报 2010[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
- [42] 刘毅, 贾若祥, 侯晓丽. 中国区域水资源可持续利用评价及类型划分[J]. *环境科学*, 2005, **26**(1): 42-46.
Liu Y, Jia R X, Hou X L. Evaluation of China's regional sustainable utilization of water resources and its type classification [J]. *Environmental Science*, 2005, **26**(1): 42-46.
- [43] 国家发展和改革委员会, 水利部. 《国家节水行动方案》[J]. *山西水利*, 2019, **35**(4): 5-9.
- [44] 王亦宁, 李肇桀. 非常规水源利用现状、问题和对策建议 [J]. *水利发展研究*, 2020, **20**(10): 75-80.
- [45] 许田. “十四五”时期生态环境污染防治的重点方向[J]. *化工管理*, 2021, **34**(10): 39-40.
Xu T. Key direction on pollution prevention of ecological environment during the period of the “14th Five-Year Plan” [J]. *Chemical Management*, 2021, **34**(10): 39-40.

环境科学

CONTENTS

Research Progress of SOA Formation from Anthropogenic VOCs Under Complex Pollution Condition	CHEN Tian-zeng, LIU Jun, MA Qing-xin, <i>et al.</i>	(1201)
Advances in Microbial Degradation and Transformation of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs)	SUN Hong-wen, FANG Bo, CHEN Hao, <i>et al.</i>	(1214)
Research Progress on Remote Sensing Monitoring of Lake Water Quality Parameters	WANG Si-meng, QIN Bo-qiang	(1228)
Research Progress on Trojan-horse Effect of Microplastics and Heavy Metals in Freshwater Environment	ZHAO Wei-gao, TIAN Yi-mei, ZHAO Peng, <i>et al.</i>	(1244)
Temporal and Spatial Characteristics of Net CO ₂ Emissions and Decoupling Analysis in Yangtze River Economic Belt	WU Yi-fan, XU Yang, TANG Yang-bo, <i>et al.</i>	(1258)
Changes in Land Use Carbon Emissions and Coordinated Zoning in China	LI Yuan-yuan, WEI Wei, ZHOU Jun-ju, <i>et al.</i>	(1267)
Multi-dimensional Analysis of the Synergistic Effect of Pollution Reduction and Carbon Reduction in Tianjin Based on the STIRPAT Model	LIU Mao-hui, YUE Ya-yun, LIU Sheng-nan, <i>et al.</i>	(1277)
Railway Emission Trends in China Based on Fuel Life Cycle Analysis	TONG Hui, FAN Zhao-yang, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i>	(1287)
Pollution Characteristics of PM _{2.5} Chemical Composition in Zhejiang Province	ZHOU Jing-qing, YU Lei, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i>	(1297)
Seasonal Variations, Size Distributions, and Sources of Chemical Components of Submicron Particulate Matter in Nanjing	XU Zhen-qi, SHANG Yue, DING Feng, <i>et al.</i>	(1310)
Seasonal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Components in Luoyang: Implication for Brown Carbon Contribution	YAN Guang-xuan, HOU Ming-yang, ZHANG Pu-zhen, <i>et al.</i>	(1319)
Establishment and Spatial Distribution of S/IVOCs Emission Inventory in Jiangsu Province in 2019	SONG Tong-ai, ZHANG Jia-ying, GUAN Lu, <i>et al.</i>	(1328)
Compositional Characteristics of Volatile Organic Compounds in Typical Industrial Areas of the Pearl River Delta: Importance of Oxygenated Volatile Organic Compounds	SONG Xin, YUAN Bin, WANG Si-hang, <i>et al.</i>	(1336)
Evolution and Characteristics of Full-process Vehicular VOCs Emissions in Tianjin from 2000 to 2020	SUN Lu-na, ZHONG Chong-zhi, SUN Shi-da, <i>et al.</i>	(1346)
Port-owned Mobile Source Air Pollutant Emission Inventory	XU Xiao-fan, WANG Bao-qing, WU Jun-cheng, <i>et al.</i>	(1357)
Simulation and Regulation of Sustainable Utilization of Water Resources in China Based on Improved Water Resources Ecological Footprint Model	OUYANG Xing-tao, LIAO Hao-yu, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i>	(1368)
Occurrence Distribution and Risk Assessment of Organophosphate Esters in A Typical Area of the Estuary in the Yellow River Basin	CAO Miao, GUO Chang-sheng, ZHANG Heng, <i>et al.</i>	(1378)
Pollution Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Sediments of Huixian Karst Wetland in Guilin	YU Yue, XING Xin-li, CHENG Cheng, <i>et al.</i>	(1387)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments from Major River Systems in Maoming City, Guangdong Province	CHEN Xiao-xia, ZHANG Min, LI Bei, <i>et al.</i>	(1397)
Temporal-spatial Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Water of Ningbo	XU Mei-juan, YANG Jia, REN Xiao-jing, <i>et al.</i>	(1407)
Analysis of Water Chemistry Characteristics and Hydraulic Relationships of Different Water Bodies in Typical Mountain-oasis Systems in the Northwest Inland Area	WANG Shi-yu, SUN Cong-jian, CHEN Wei, <i>et al.</i>	(1416)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Pore-water in the Middle and Upper Reaches of Muwen River	LIU Yuan-qing, ZHOU Le, LÜ Lin, <i>et al.</i>	(1429)
Spatial-temporal Variation in Groundwater Quality and the Contamination Source Analysis in Shihezi-Changji Area	DING Qi-zhen, ZHOU Jin-long, JI Yan-zhen, <i>et al.</i>	(1440)
Analysis of Mechanism and Start-up Thresholds of Seasonal Algal Blooms in a Northern Eutrophic Stratified Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, KONG Chang-hao, <i>et al.</i>	(1452)
Characteristics of Benthic Diatom Community Structure and Water Ecological Health Evaluation in the Lalin River Basin	SHAN Tao, YUAN An-long, HUANG Zi-rui, <i>et al.</i>	(1465)
Bacterioplankton Communities and Assembly Mechanisms in Wet Season of Lakes, Nanchang	GAO Peng-fei, WANG Peng, HUANG Yi, <i>et al.</i>	(1475)
Seasonal Variation and Influencing Factors of Bacterial Communities in Storage Reservoirs	DING Ning, YANG Ying-ying, WAN Nian-xin, <i>et al.</i>	(1484)
Vertical Distribution and Source Tracking Analysis of Bacteria Composition and Nitrogen Metabolism Function of a Typical Urban Inland River	TAN Qiu-yang, LÜ Jin-yan, BAI Xian-yu, <i>et al.</i>	(1497)
Contribution Analysis of External Source Pollution Load and Environmental Capacity Estimation of Reservoirs in Central Yunnan Plateau	GUO Yu-jing, LI Hong-bing, WANG Shu-ming, <i>et al.</i>	(1508)
Preparation of Narrow Pore Diameter Phosphorus Containing Cotton Stalk Carbon and Its Adsorption Mechanism for Tetracycline	ZENG Shao-yi, LI Kun-quan	(1519)
Preparation of High Specific Surface Thiourea Modified Peanut Shell Carbon and Adsorption of Tetracycline and Copper	MIN Bing-kun, LI Kun-quan	(1528)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes on Different Water Supply Pipes	LIU Chen-xu, BAI Xiao-hui	(1537)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Sequestration and Aggregate Stability in Water-Eroded Environment: A Meta-analysis	YANG Rui-zhe, YANG Shi-long, WENG Xi-zhe, <i>et al.</i>	(1542)
Effects of Warming and Fertilization on Soil Organic Carbon and Its Labile Components in Rice-wheat Rotation	DENG Xu-zhe, HAN Chen, XUE Li-xiang, <i>et al.</i>	(1553)
Horizontal Variation Characteristics of Alpine Grassland Soil Function and Vertical Changes Along Soil Genetic Horizons in the Three-River Headwaters Region	LI Bo-jian, SHEN Cong-cong, LIU Si-yi, <i>et al.</i>	(1562)
CH ₄ Fluxes and Their Comprehensive Greenhouse Effects with CO ₂ Fluxes in Direct-seeded Rice in Poyang Lake Plain	SHI Yuan-zhi, CUI Yuan-lai, CAI Shuo, <i>et al.</i>	(1572)
Vertical Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil PAHs in Different Land Use Types	ZHOU Zhi-yan, ZHANG Xiu-xiu, WANG Fei, <i>et al.</i>	(1583)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Per- and Polyfluoroalkyl Substances and Emerging Alternatives in Road Dust, Shijiazhuang	LI Peng-fei, WANG Yuan, YANG Chen, <i>et al.</i>	(1593)
Spatial Distribution Characteristics and Assessment of Heavy Metal Pollution in Cultivated Soil of Agricultural Small Watershed in Typical Mining Area in South China	YANG Yu, GUO Ting-ting, LIU Xiao-li, <i>et al.</i>	(1602)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Vegetable Field in the Three Gorges Reservoir Area (Chongqing Section)	SHI Yu-jia, FANG Lin-fa, FANG Biao, <i>et al.</i>	(1611)
Accumulation Characteristics and Influencing Factors of Heavy Metals in Cultivated Land Surface Soil in Lanzhou	KANG Le, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i>	(1620)
Enrichment Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Industrial and Mining Area of Northern Guangdong Province	WANG Yue, MO Li, YU Xin-xiao, <i>et al.</i>	(1636)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soil of a Lead Plant in Sanmenxia	LU Xiao-hui, YU Fang-zhong, FAN Yi-ming, <i>et al.</i>	(1646)
Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soils of a Testing Range	WANG Shi-yu, LI Chun, ZHAO Hong-wei, <i>et al.</i>	(1657)
Effectiveness and Mechanisms of Chemical Leaching Combined with Electrokinetic Technology on the Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil	MA Qiang, WEI Ze-bin, WU Qi-tang	(1668)
Emission Characteristics and Control of Heavy Metals in Secondary Copper Smelting Process	LIN Bing-cheng, WU Guang-long, ZHENG Ming-hui, <i>et al.</i>	(1678)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Soil-crops System in Anhui Section of the Yangtze River Basin	LIU Hai, WEI Wei, HUANG Jian-min, <i>et al.</i>	(1686)
In-situ Remediation Effect of Cadmium-polluted Agriculture Land Using Different Amendments Under Rice-wheat Rotation	ZHANG Lu, TANG Chan, YU Hai-ying, <i>et al.</i>	(1698)
Effect and Persistent Effect of Thiolated Montmorillonite on Safe Production in Cadmium-contaminated Cropland	FENG Xian-cui, CHEN Ya-gang, JIAO Hong-peng, <i>et al.</i>	(1706)
Effects of Earthworm, Straw, and Citric Acid on the Remediation of Zn, Pb, and Cd Contaminated Soil by <i>Solanum photeinocarpum</i> and <i>Pterocypselia indica</i>	CHEN Min-ni, NIE Xiao-qi, ZHANG Xing-feng, <i>et al.</i>	(1714)
Availability of Se-rich Arable Land in High Geological Background Area and Suggestions for Zoning	WANG Rui, LI Yu, YU Jing, <i>et al.</i>	(1727)
Characteristics and Causes of Ge Enrichment in Vegetable Growing Areas of Beixintun Town, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, JIN Ai-fang, <i>et al.</i>	(1735)
Structural Diversity and Its Temporal Variation in the Soil Bacterial Community Under Plantations of <i>Taxodium distichum</i> in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir Area	TAN Xue, DONG Zhi, ZHANG Li-miao, <i>et al.</i>	(1748)
Effect of the Process of Returning Farmland to Forest in the Loess Hilly Area on Soil Fungal Communities	ZHANG Lei, WANG Qiang, YANG Xin-yue, <i>et al.</i>	(1758)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Substitute with Organic Fertilizer on Soil Functional Microbes and Lemon Yield and Quality	WANG Ying-yan, XIONG Zi-yi, LUO Dong-hai, <i>et al.</i>	(1768)
Dynamic Changes in Antibiotic Resistance Genes During Biological Fermentation of Chicken Manure and Pig Manure	ZHANG Dan, PENG Shuang, WANG Dan-qing, <i>et al.</i>	(1780)
Effects of Cow Manure Application on Soil Microbial Community in Farmland	ZHANG Ya-li, GUO Xiao-ming, HU Hui, <i>et al.</i>	(1792)