

# 基于环境质量标准的环境承载力评价方法 及其应用

刘年磊, 卢亚灵, 蒋洪强\*, 程 曦

(环境保护部环境规划院, 国家环境保护环境规划与政策模拟重点实验室, 北京 100012)

**摘 要:**建立资源环境承载能力监测预警机制,是全面深化改革的一项创新性工作。本文从环境承载力评价视角出发,提出了一种基于环境质量标准的环境承载力评价模型,即通过计算污染物浓度超标指数衡量大气、水及综合环境承载力状况,并以京津冀地区为试点开展案例研究。评价结果显示:①环境综合承载力方面,99%的区县超载。②大气环境承载力方面,可吸入颗粒物( $PM_{10}$ )和细颗粒物( $PM_{2.5}$ )是主要污染因子,98%的区县超载;臭氧( $O_3$ )和二氧化氮( $NO_2$ )的超标状况也非常严重,分别有87%、72%的区县超载。③水环境承载力方面,进行评价的108个区县全部超载,总氮(TN)、溶解氧(DO)、氨氮( $NH_3-N$ )和总磷(TP)为主要的超标污染因子。该评价模型以环境质量为基础,客观地反映了环境承载力状态,可广泛应用于中国不同尺度单元环境承载力的评价。

**关键词:**环境承载力;污染物浓度;环境质量标准;超标指数;京津冀地区

## 1 引言

改革开放以来,中国经济社会持续快速发展,但过度依赖高资源消耗、高污染排放的粗放型发展模式,导致环境污染和生态破坏问题突出,资源环境越来越成为经济社会发展的制约瓶颈,严重地影响中国现代化进程。党的十八届三中全会通过的《中共中央关于全面深化改革若干重大问题的决定》明确指出,“建立资源环境承载能力监测预警机制,对水土资源、环境容量和海洋资源超载区域实行限制性措施”。可见,建立资源环境承载能力监测预警机制,是全面深化改革的一项重大任务(樊杰等, 2015)。环境承载力是资源环境承载力的重要组成部分,深入开展环境承载力研究,对于建立全国资源环境承载力监测预警机制具有重要的支撑作用,同时对于转变中国经济发展方式、优化国

土空间开发格局、推进可持续发展具有重大意义(王传胜等, 2012; 姚士谋等, 2014)。

环境承载力概念是随着人类对环境问题认识的不断深入以及环境科学的发展而提出的,其理论雏形源自于环境容量。目前,环境承载力并没有统一的定义,且部分学者将其纳入可持续发展的范畴进行研究(Clarke, 2002; Peng et al, 2011; 彭建等, 2012)。最常见的是从“阈值”角度定义,如:环境承载力是指在一定时期、一定状态或条件下、一定的区域范围内,在维持区域环境系统结构不发生质的变化、环境功能不遭受破坏的前提下,区域环境系统所能承受的人类各种社会经济活动的的能力,即环境对区域社会经济活动的最大支持能力,是环境的基本属性和有限的自我调节能力的量度(曾维华等, 2014)。环境承载力的大小可用人类活动导致的污染物排放的规模、强度、速度等指标表示。根

收稿日期:2017-01;修订日期:2017-03。

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07601-002);环境保护部财政预算重点项目(2110107);中国科学院科技服务网络计划(STS计划)项目(KFJ-STZ-ZDTP-021) [Foundation: National Science and Technology Major Project, No. 2012ZX07601-002; Finance Budget Major Project of Ministry of Environmental Protection, No. 2110107; Science and Technology Service Network Initiative of the Chinese Academy of Sciences, No. KFJ-STZ-ZDTP-021]。

作者简介:刘年磊(1984-),女,辽宁葫芦岛人,副研究员,主要从事环境规划与管理研究,E-mail: liunl@caep.org.cn。

通讯作者:蒋洪强(1975-),男,重庆人,研究员,主要从事环境规划与区域经济研究,E-mail: jianghq@caep.org.cn。

引用格式:刘年磊, 卢亚灵, 蒋洪强, 等. 2017. 基于环境质量标准的环境承载力评价方法及其应用[J]. 地理科学进展, 36(3): 296-305. [Liu N L, Lu Y L, Jiang H Q, et al. 2017. Environmental carrying capacity evaluation methods and application based on environmental quality standards[J]. Progress in Geography, 36(3): 296-305.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2017.03.004

据不同环境要素,环境承载力包括大气环境承载力、水环境承载力等。

目前,国内外对于环境承载力概念以及评估理论和方法尚没有统一的认识,评估方法繁杂多样,总结归纳目前应用较广的评估方法主要包括指标体系综合评价法、生态足迹法、系统动力学方法、优化决策模型方法、承载率评价法5大类。其中,指标体系综合评价法是通过将反映经济、社会、资源环境、生态状况的多种指标综合成一个指数或综合指标来评价区域的承载能力。常用的指标体系综合评价法有层次分析法(Peng et al, 2016)、PSR(压力—状态—响应)(Wei et al, 2014; 王奎峰等, 2014; Zheng et al, 2015)、矢量模法(李磊等, 2014)、模糊综合评价法(Gong et al, 2009; 段新光等, 2014)、主成分分析法(王春娟等, 2012)和模糊物元模型(张会涓等, 2012)等。指标体系综合评价法主要优点是计算结果的综合性强,计算过程相对简单,但该方法的结果通常为单一指数,相对抽象,难以对具体管理实践形成有效指导。生态足迹法是承载力量化的另一经典方法,是一种从资源的供需角度研究承载力问题的模型,该方法通过数学转换方法将区域的自然资源和人类活动强度折合为标准的生产性土地面积,通过比较两者之间的差异判断承载力状况(Wackernagel et al, 1998; Sutton et al, 2012; 刘东等, 2012),该方法相对成熟和稳健,结果直观且易于理解,缺点是涉及大量生产力转换参数,在不同区域应用时,面临本土化参数缺少问题和不同生产性土地功能替代性的假设问题。系统动力学在处理复杂、非线性和反馈问题上具有一定的优势,近年来在环境承载力领域得到广泛应用(徐琳瑜等, 2013; 王西琴等, 2014; Yang et al, 2015; Zeng et al, 2016),但该模型的优化功能相对较弱。优化模型是环境承载力研究中的另一重要模型,能够处理非线性、动态、不确定性、多目标等多种复杂问题,在环境承载力研究中得到广泛应用(Wang et al, 2013; 叶龙浩等, 2013; Li et al, 2016; 高伟等, 2016)。相对于其他模型,优化模型的计算结果与管理实践联系紧密且模型功能较为稳健。承载率评价法也是目前应用较多的一种评价方法,首先是建立模拟模型计算各项污染因子环境容量,通过污染物排放量与环境容量比较来表征环境要素承载力状况(薛文博等, 2014; 白辉等, 2016),显然,该方法的核心为环境容量的核算,而目前中国环境容量核算在技术方法、数据支持、计算结果的科学性等方面还存在诸多不

确定性,短期内难以广泛应用。

从上述各类方法比较分析来看,不同的环境承载力评价方法各具特点,在应用范畴、可操作性、适用性等方面存在较大差距,且目前大多局限于不同区域层面单一环境要素的示范应用研究,尚未形成统一、标准化、系统科学的方法体系,受技术层面、数据支撑等因素影响而难于推广应用。准确评估区域环境承载状态是实施环境承载力系统调控的前提条件。环境质量是环境承载状态的最终表现,按照环境质量变化状态进行环境承载管理是一种有效且科学合理的方式(樊杰等, 2015)。鉴于此,本文以一种全新视角,综合考虑中国环境污染特征、数据获取等因素,聚焦于大气、水环境承载力,同时考虑科学性、可操作性、推广性等基本原则,提出了基于环境质量标准的环境承载力评价方法,即通过计算污染物浓度超标指数衡量环境承载力状况,并以京津冀地区为案例开展示范研究,以期为全国层面的资源环境承载力监测预警机制提供重要基础支撑。

## 2 环境承载力评价方法

### 2.1 评价指标

环境承载力评价主要表征区域环境系统对社会经济活动产生的各类污染物的承受与自净能力,采用污染物浓度超标指数作为评价指标,通过主要大气和水污染物的年均浓度监测值与国家现行的该污染物质量标准的对比反映。本文根据中国现行环境质量标准中的大气和水污染物监测指标,选取能反映环境质量状况的主要监测指标作为单项评价指标。其中,主要大气污染物指标包括二氧化硫( $\text{SO}_2$ )、二氧化氮( $\text{NO}_2$ )、一氧化碳( $\text{CO}$ )、臭氧( $\text{O}_3$ )、可吸入颗粒物( $\text{PM}_{10}$ )和细颗粒物( $\text{PM}_{2.5}$ )等6项;主要水污染物指标包括溶解氧( $\text{DO}$ )、高锰酸盐指数( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )、五日生化需氧量( $\text{BOD}_5$ )、化学需氧量( $\text{COD}_{\text{Cr}}$ )、氨氮( $\text{NH}_3\text{-N}$ )、总氮( $\text{TN}$ )和总磷( $\text{TP}$ )等7项,考虑河流和湖库在区域地表水环境质量评价中的差异性,进一步选取相应评价指标,如对于评价区域中的河流选择除总氮( $\text{TN}$ )以外的6项指标进行评价,湖库则选择上述7项指标进行评价。

### 2.2 评价方法

#### 2.2.1 大气环境承载力评价

##### (1) 单项大气污染物浓度超标指数

以各项污染物的标准限值表征环境系统所能

承受人类各种社会经济活动的阈值(通常限值采用《环境空气质量标准》(GB3095-2012)中规定的各类大气污染物浓度限值二级标准),不同区域各项污染指标的超标指数计算公式如下:

$$R_{\epsilon_{ij}} = C_{ij}/S_i - 1 \quad (1)$$

式中:  $R_{\epsilon_{ij}}$  为区域  $j$  内第  $i$  项大气污染物浓度超标指数,  $C_{ij}$  为区域  $j$  内第  $i$  项污染物的年均浓度监测值,  $S_i$  为第  $i$  项污染物浓度的二级标准限值。  $i=1, 2, \dots, 6$ , 分别对应  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 。

## (2) 区域大气污染物浓度超标指数

计算公式如下:

$$R_{\epsilon_j} = \max_i (R_{\epsilon_{ij}}) \quad (2)$$

式中:  $R_{\epsilon_j}$  为区域  $j$  的大气污染物浓度超标指数, 其值为各类大气污染物浓度超标指数的最大值。

## 2.2.2 水环境承载力评价

### (1) 单项水污染物浓度超标指数

以各控制断面  $\text{DO}$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{BOD}_5$ 、 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{TN}$ 、 $\text{TP}$  等主要污染物年均浓度与该项污染物一定水质目标下水质标准限值的差值作为水污染物超标量。标准限值采用国家 2020 年各控制单元水环境功能分区目标中确定的各类水污染物浓度的水质标准限值(具体限值采用《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中规定的各类水污染物浓度不同水质类别下的限值)。计算公式如下:

当  $i=1$  时:

$$R_{\text{水}ijk} = 1/(C_{ijk}/S_{ik}) - 1 \quad (3)$$

当  $i=2, \dots, 7$  时:

$$R_{\text{水}ijk} = C_{ijk}/S_{ik} - 1 \quad (4)$$

$$R_{\text{水}ij} = \sum_{k=1}^{N_j} R_{\text{水}ijk} / N_j, i = 1, 2, \dots, 7 \quad (5)$$

式中:  $R_{\text{水}ijk}$  为区域  $j$  第  $k$  个断面第  $i$  项水污染物浓度超标指数,  $R_{\text{水}ij}$  为区域  $j$  第  $i$  项水污染物浓度超标指数;  $C_{ijk}$  为区域  $j$  第  $k$  个断面第  $i$  项水污染物的年均浓度监测值,  $S_{ik}$  为第  $k$  个断面第  $i$  项水污染物的水质标准限值。  $i=1, 2, \dots, 7$ , 分别对应  $\text{DO}$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{BOD}_5$ 、 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{TN}$ 、 $\text{TP}$ ;  $k$  为某一控制断面,  $k=1, 2, \dots, N_j$ ,  $N_j$  表示区域  $j$  内控制断面个数。这里, 当  $k$  为河流控制断面时, 计算  $R_{\text{水}ijk}$ ,  $k=1, 2, \dots, 5, 7$ ; 当  $k$  为湖库控制断面时, 计算  $R_{\text{水}ijk}$ ,  $k=1, 2, \dots, 7$ 。

## (2) 区域水污染物浓度超标指数

计算公式如下:

$$R_{\text{水}jk} = \max_i (R_{\text{水}ijk}) \quad (6)$$

$$R_{\text{水}j} = \sum_{k=1}^{N_j} R_{\text{水}jk} / N_j \quad (7)$$

式中:  $R_{\text{水}jk}$  为区域  $j$  第  $k$  个断面的水污染物浓度超标指数,  $R_{\text{水}j}$  为区域  $j$  的水污染物浓度超标指数。

## 2.2.3 环境承载力综合评价方法

由于大气、水是不同的环境要素, 不宜采用加权平均等综合方法进行综合评价, 因此, 本文采用极大值模型进行污染物浓度的综合超标指数计算。计算公式如下:

$$R_j = \max(R_{\epsilon_j}, R_{\text{水}j}) \quad (8)$$

式中:  $R_j$  为区域  $j$  的污染物浓度综合超标指数,  $R_{\epsilon_j}$  为区域  $j$  的大气污染物浓度超标指数,  $R_{\text{水}j}$  为区域  $j$  的水污染物浓度超标指数。

## 2.3 阈值及重要参数

由上述的各项污染物浓度超标指数值特点以及其模型的计算方法可知, 最终计算获得的污染物浓度超标指数值是无量纲值。“0”为污染物浓度超标指数临界值, 污染物浓度超标指数越小, 表明区域环境系统对社会经济系统的支撑能力越强。根据污染物浓度超标指数, 将单要素及综合环境承载力评价结果划分为超载、临界超载和不超载 3 种类型, 并进一步将超载类型划分为轻度超载、中度超载和重度超载 3 个等级。通过文献调研和专家咨询, 借鉴环境承载力评价划分标准经验值(王金南等, 2013), 确定单要素及综合污染物浓度超标指数的阈值。研究经验表明, 当超标指数( $R$ )大于 2 时, 可划定为重度超载状态; 当超标指数( $R$ )介于 1~2 之间时, 划定为中度超载状态; 当超标指数( $R$ )介于 0~1 之间时, 划定为轻度超载状态; 当超标指数( $R$ )介于 -0.2~0 之间时, 划定为临界超载状态; 当超标指数( $R$ )小于 -0.2 时, 划定为不超载状态。

# 3 案例研究

## 3.1 京津冀地区概况及数据来源

京津冀地区位于中国环渤海心脏地带, 是北方经济规模最大、最具活力的地区。2014 年, 京津冀地区总面积 22.69 万  $\text{km}^2$ , 常住人口 1.11 亿, 生产总值 6.65 万亿元。京津冀地区是全国大气污染、水污染最严重, 水资源最短缺, 资源环境与发展矛盾最为尖锐的地区, 也是当前及未来京津冀协同发展面



临的最大挑战。从大气污染状况来看,近年来京津冀地区大气污染问题十分严重,已全面亮起“红灯”,尤其是 $\text{PM}_{2.5}$ 污染已成为当地人民群众的“心肺之患”。2011-2014年,京津冀地区 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 排放得到一定的控制,烟粉尘排放量先降后升(2014年大幅上升)。 $\text{SO}_2$ 排放来源主要为工业源,其次是生活源,集中式源排放比例很少。 $\text{NO}_x$ 排放来源主要为工业源和机动车尾气,2014年工业排放占65%左右,机动车占32%左右,生活源和集中式源排放较少。烟粉尘排放来源以工业排放为主。从水污染状况来看,京津冀地区水安全问题非常突出、形势越来越严峻。2014年京津冀水资源总量约占全国0.51%,COD排放量约占全国7.2%,氨氮排放量约占全国6.1%,劣V类断面约占全国14.2%。从水污染物不同排放源来看,2014年京津冀地区农业和生活源COD和氨氮排放量之和分别约占排放总量的86.8%和87.8%,工业源COD和氨氮排放量占比分别约为12.3%和11.4%,且集中式排放占比较低。显然,农业和生活排放源已成为京津冀地区水污染排放的主要来源。

本文数据来源为:京津冀地区大气及水环境质量监测数据来自北京市环境保护监测中心、天津市环境监测中心、河北省环境监测中心站。具体数据包括:2014年京津冀三省(市)各区县 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{O}_3$ 和 $\text{PM}_{2.5}$ 等6项监测指标的年均质量浓度数据;2014年京津冀三省(市)国控、省控、市控 $\text{DO}$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{BOD}_5$ 、 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{TN}$ 和 $\text{TP}$ 等7项监测指标的年均质量浓度数据。基于现有数据,大气环境承载力评价单元为203个区县,水环境承载力评价单元为108个区县,其中 $\text{TN}$ 指标评价单元为18个区县。

### 3.2 大气环境承载力评价结果

#### (1) 大气环境承载力综合评价结果

根据大气环境承载力评价方法,对2014年京津冀地区的13个地市203个区县的6种大气污染物浓度超标指数进行计算,并以此表征大气环境承载力,计算结果如图1所示。京津冀地区大气污染形势整体较为严峻,从北向南超载逐步加重,如张家口个别区县为临界超载,而河北南部保定、石家庄、衡水、邢台、邯郸等市的大部分区县处于重度超载状态。

评价结果表明,京津冀地区203个区县中的201个区县大气环境均为超载状态,只有2个县为

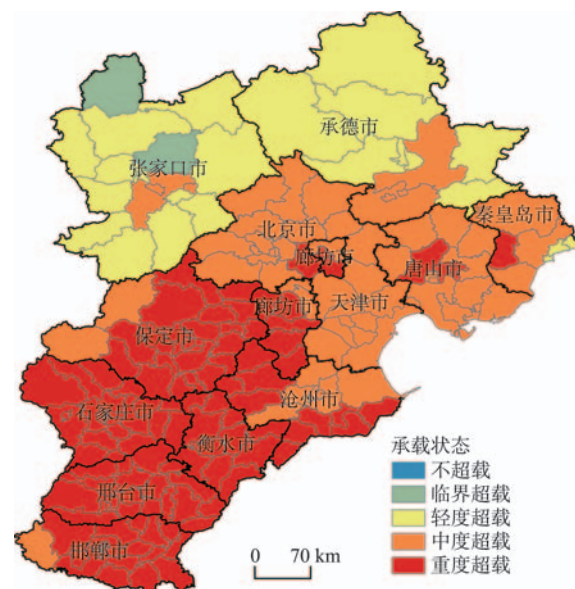


图1 2014年京津冀地区大气环境承载力评价结果

Fig.1 Evaluation results of atmospheric environmental carrying capacity of the Beijing-Tianjin-Hebei region in 2014

临界超载。河北省大多数区县的大气环境综合超标指数都在1.00~3.00之间,处于中度或重度超载状态。大气环境综合超载最严重的区县为保定的安国市,超标指数为3.49;保定市的清苑县、容城县、徐水县、定兴县、蠡县、博野县、望都县大气环境超载也很严重,其超标指数均在3.20以上,列河北省倒数前10位;其他倒数前10位的还有邢台市的隆尧县、邯郸市的峰峰矿区。张家口市、承德市各区县大气环境在河北省相对较好,但是多数也处于轻度超载状态。张家口的康保县、崇礼县超标指数分别为0.00和-0.17,系临界超载;张家口市桥东区、桥西区、张北县、沽源县、怀安县、赤城县,承德市围场满族蒙古族自治县以及张家口市尚义县为轻度超载,列河北省大气综合承载形势较好的前10位。北京市、天津市各区县的大气环境也都属超载状态,程度介于河北省的张承和其他地区之间。其中,除通州区的超标指数为2.03外,其余区县的指数在1.00~2.00之间,处于中度超载状态。

#### (2) 单项指标大气环境承载力评价结果

对于京津冀地区,导致其大部分城市大气污染物浓度超标严重的单项指标为颗粒物,其中 $\text{PM}_{2.5}$ 为首要影响因素。对于 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{10}$ 两项指标,98%的区县超载,仅张家口市的崇礼县不超载,其分布规律与综合评价结果接近。对于 $\text{NO}_2$ 指标,72%的区县超载,主要分布在石家庄、唐山、保定、邢台等南

部城市,以及北京、天津等人口较为集中、机动车保有量较高的超大城市。 $O_3$ 超载区县也较多,达到85%,主要分布于北京、天津、唐山、廊坊、保定等城市。 $SO_2$ 形势相对较好,66%的区县不超载或临界超载,不超载区县主要集中在张家口、承德、北京等北部城市;超载区县多分布于石家庄、邯郸、邢台等南部城市。 $CO$ 形势也相对较好,超载区县比例相对较低、为36%,主要分布在唐山、保定、邯郸等城市。主要大气污染物承载力评价结果如图2所示。

### 3.3 水环境承载力评价结果

#### 3.3.1 水环境承载力综合评价结果

利用水环境承载力评价方法,对京津冀地区13个地级以上城市108个区县水污染物浓度综合超标指数以及7个单项污染物指标的超标指数进行计

算,并对相应超载状态进行判断,结果如图3所示。评价结果表明,2014年京津冀三省(市)水环境形势十分严峻,水环境综合超标指数达到2.67。其中河北省的超载程度最为严重,其超标指数达到2.75,而北京和天津两地的超标指数分别为1.94和2.59,分别处于中度和重度超载状态。从单项污染指标的超标状况来看,京津冀三省(市)的TN、DO、 $NH_3-N$ 和TP等4项指标处于超标状态,成为京津冀三地的主要水污染因子。

评价结果显示,参与评价的京津冀地区108个区县均处于超载状态。其中,沧州市的泊头和献县、石家庄市的正定县以及保定市的涿州超载情况最为严重,其超标指数分别为24.35、22.93、16.33和10.44;其次是保定市的清苑县、石家庄市的深泽县、

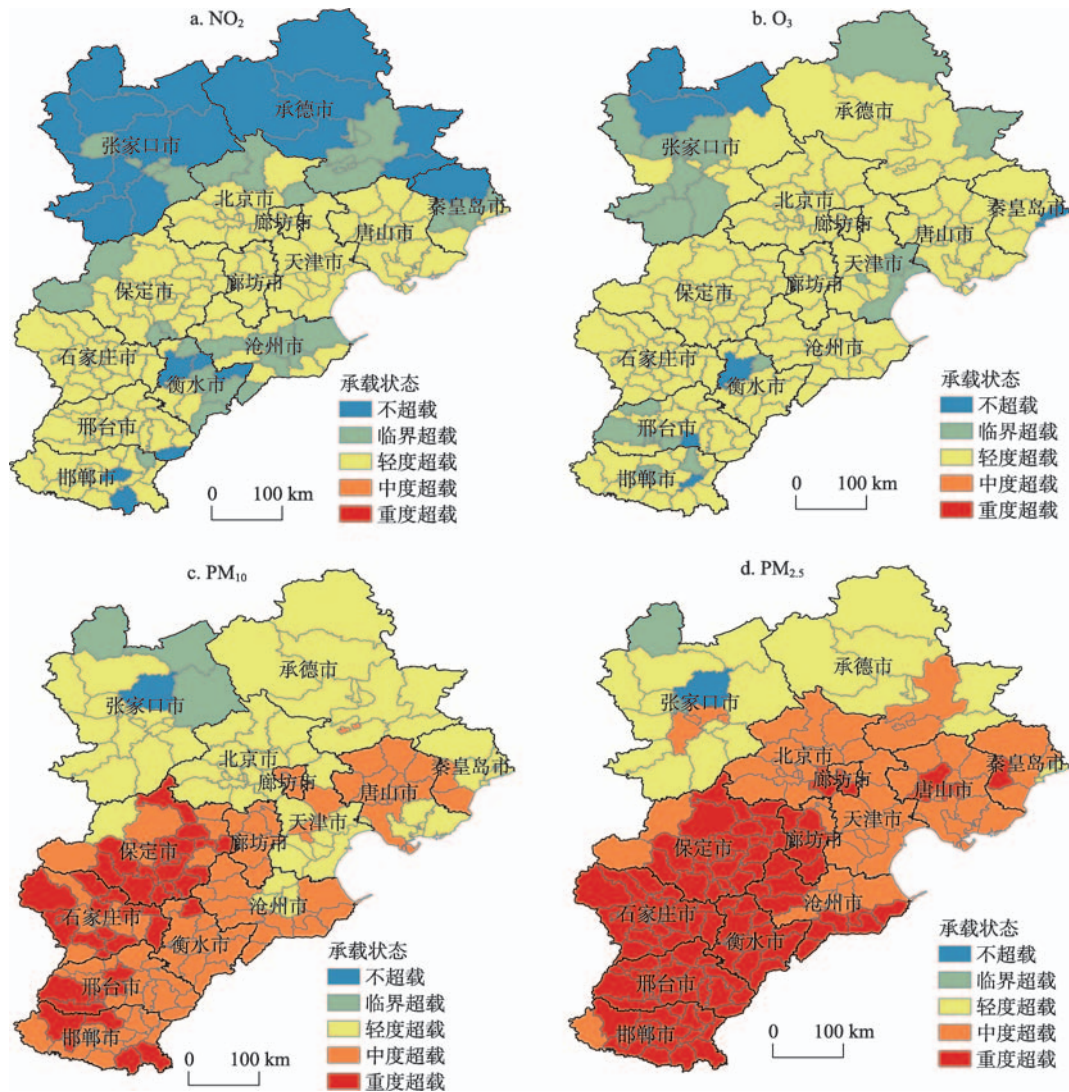


图2 2014年京津冀地区单项指标大气环境承载力评价结果

Fig.2 Evaluation results of single-index atmospheric environmental carrying capacity of the Beijing-Tianjin-Hebei region in 2014



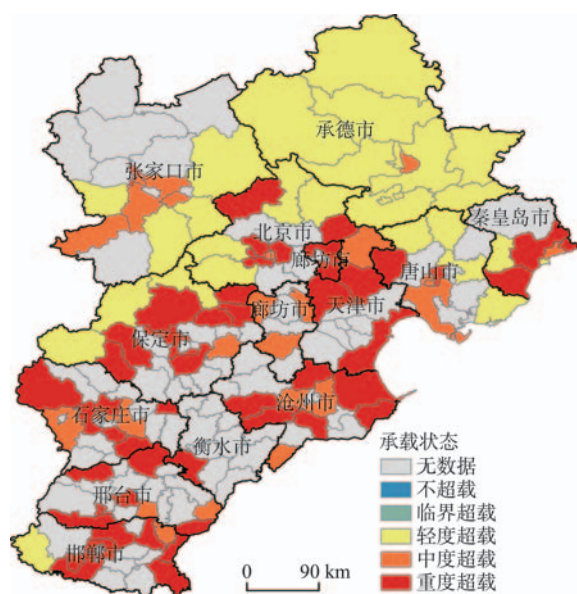


图3 2014年京津冀地区水环境承载力评价结果

Fig.3 Evaluation results of water environmental carrying capacity of the Beijing-Tianjin-Hebei region in 2014

秦皇岛市的抚宁县、天津市的武清区、邢台市的桥东区、衡水市的冀州市、石家庄市的赵县、保定市的高碑店市,超标指数介于5~10之间;其他也处于重度超载的区县主要集中在北京市、天津市、石家庄、廊坊市、邢台市、沧州市、保定市和邯郸市,超标指数介于2~5之间;承德市、秦皇岛市、张家口市和唐山市的大部分区县处于轻度或中度超载状态,其超标指数介于0~1.5之间,整体水环境质量状况相对较好。其中承德市的水环境质量状况最好,在其所辖的11个区县中,滦平县、围场县、丰宁县、承德县和兴隆县等5个区县超标指数处于0.6以内,其他6个区县超标指数介于0.6~1.0之间。

### 3.3.2 单项指标水环境承载力评价结果

京津冀地区除 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 和 $\text{BOD}_5$ 以外,其他( $\text{DO}$ 、 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{TN}$ 和 $\text{TP}$ 等)5项污染指标处于超载或临界超载状态。其中, $\text{TN}$ 和 $\text{DO}$ 分别处于重度和中度超载状态,超标指数分别为3.65和1.13; $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 $\text{TP}$ ,处于轻度超载状态,超标指数分别为0.66和0.23; $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 的超标指数为-0.02,处于临界超载状态。主要水污染物承载力评价结果如图4所示。

对于 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ ,京津冀地区大部分区县处于不超载状态,其中张家口市的桥西区和石家庄市的长安区超标指数最低,分别约为-0.80和-0.81。对于 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ ,有38%的区县处于超载状态,超载程度最高的区县为石家庄市的深泽县、沧州市的献县和泊头

市,其超标指数分别约为4.61、2.62和2.60。对于 $\text{NH}_3\text{-N}$ ,有35%的区县为超载状态。总体上, $\text{NH}_3\text{-N}$ 超载区县分布规律与 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 基本一致,但超载程度明显高于 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 。对于 $\text{TN}$ ,在所评价的18个区县中,有16个区县处于超载状态。对于 $\text{TP}$ ,有35%区县处于超载状态,其中,保定市的涿州市、沧州市的泊头市和石家庄市的正定县超载程度较为严重,其超标指数达到4以上。对于 $\text{BOD}_5$ ,有14%的区县处于超载状态,大部分区县处于不超载状态。对于 $\text{DO}$ 指标,除石家庄市的深泽县和正定县以外,其他区县均处于超载状态。

### 3.4 环境承载力评价结果

2014年京津冀地区203个区县的环境质量状况不容乐观,除张家口市的崇礼县和康保县处于临界超载状态以外,其他201个区县均处于超载状态(图5)。其中大气、水环境超载程度较为严重的区县主要分布在河北南部地区,综合超标指数列在京津冀地区后10位的区县有沧州的泊头和献县、石家庄的深泽县和正定县、邢台的桥东区、保定的清苑县和涿州市、秦皇岛的抚宁县、天津的武清区、衡水的冀州市,超标指数均在5以上,其中献县和泊头市的超标指数高达20以上,超载程度最为严重。北京、天津、唐山、邯郸四市各区县的超载程度也较高,其中北京和天津市21个区县的综合超标指数介于1~2之间,处于中度超载状态,其他11个超载区县主要受水环境超载严重影响,其综合指数在2~7之间,处于重度超载状态;唐山和邯郸两市的区县超载程度差异相对较小,其综合超标指数集中在1.5~3.3之间。张家口和承德两市各区县的超载程度相对较低,综合超标指数列在全省前10位的区县均分布在这两个市,其中张家口市崇礼县和康保县的超标指数最低,分别约为-0.17和0。

### 3.5 超载成因分析

大气环境承载力方面。京津冀地区复杂的地形地貌不利于部分区县大气污染物扩散,特别是受北部和西部燕山、太行山脉的阻挡,某种程度上中断了东南部与西北部地区大气的传输,不利于污染物扩散。但自然本底条件并不是导致其大气污染严重的根本原因。高能耗高污染的重工业较多、工业企业污染治理水平落后等因素导致河北省邢台、唐山、邯郸、石家庄等市的污染物排放量一直较大。北京、天津等区域中心城市,由于人口膨胀、交通拥堵、道路和建筑扬尘排放使得大气复合型污染

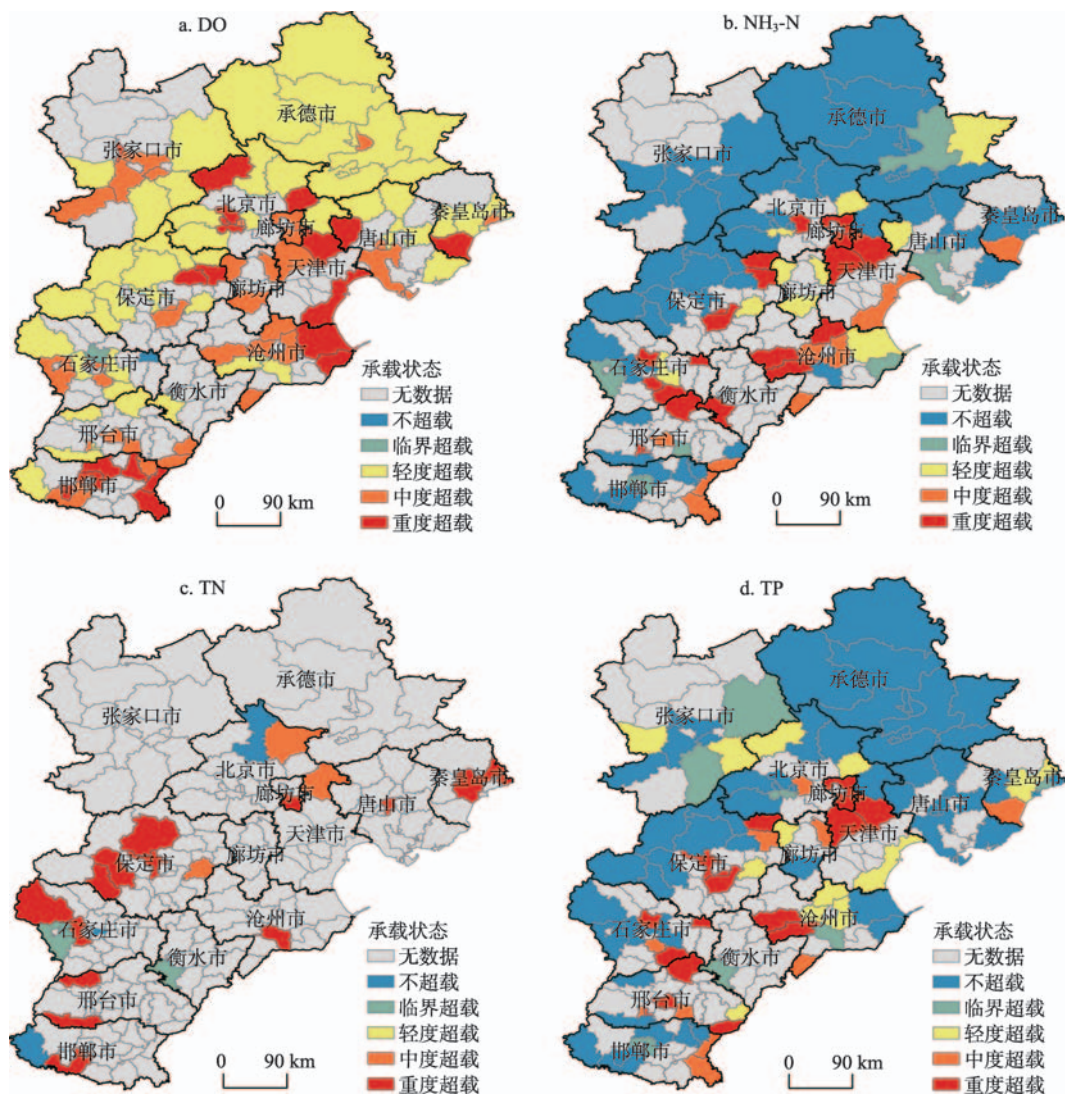


图4 2014年京津冀地区单指标水环境承载力评价结果

Fig.4 Evaluation results of single-index water environmental carrying capacity of the Beijing-Tianjin-Hebei region in 2014

特征突出。承德与张家口市因地形、气象等条件更利于大气扩散,且重污染企业也相对较少,所以大气环境承载情况相对其他城市要好。

水环境承载力方面。京津冀地区水资源极其贫乏,属资源型缺水地区,是造成其水环境严重超载的主要原因之一。2014年京津冀人均水资源量仅为全国平均水平的6.3%,不足世界平均水平的1/30。区域内平原区普遍地表断流,生态用水常年严重不足。京津冀各地市降雨量普遍偏少,随着大部分城市的不合理开发建设,地下水位大幅度下降,水体的生态补给不足、生态流量难以保障,加剧了水环境超载。与此同时,京津两地在长期快速发展中,大城市病加剧,而环绕京津的河北省,高污染、高能耗产业密集,给资源环境带来了巨大压力,导致京

津冀地区河流水质污染严重。此外,部分地区污水处理基础设施建设严重滞后和处理效果不好,也是导致京津冀地区水环境超载的重要原因之一。

## 4 结论与讨论

本文以一种全新视角,聚焦于大气、水环境承载力,提出了基于环境质量标准的环境承载力评价方法,即通过计算污染物浓度超标指数衡量环境承载力状况,并以京津冀地区为案例开展示范研究。该评价方法简便易行、符合实际、可操作性强,能为环境承载力监测预警机制的建立提供基础支撑。但在实际区县单元评价中也存在一定的局限性,由于该方法主要基于监测数据进行评价,对于无法获



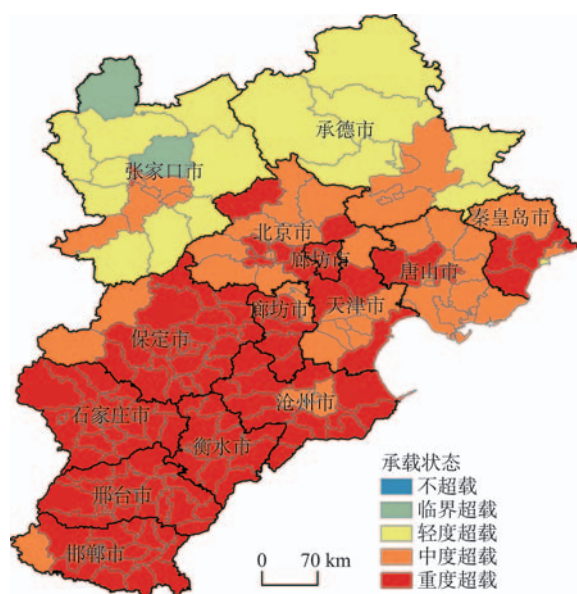


图5 2014年京津冀地区环境承载力评价结果

Fig.5 Evaluation results of environmental carrying capacity of the Beijing-Tianjin-Hebei region in 2014

取监测数据的区县将难于开展,特别是水环境评价。在未来研究中,针对缺少水质数据的区县,可采用如下措施进行补救:一是完善水质监测网络,获取更完整、详细的监测数据;二是根据流域控制单元水环境质量状况,确定水质监测数据缺失区县的水环境状况;三是综合考虑地下水监测数据、污染物排放数据、污水处理情况、水资源利用情况等因素综合分析水环境承载状态。

京津冀地区环境承载力评估结果显示:环境综合承载力方面,99%的区县超载,其中大气、水环境超载程度均较为严重的区县主要分布在衡水、沧州、邢台、廊坊、石家庄和保定等六市,张家口和承德两市各区县的超载程度相对较低。大气环境承载力方面,在进行评价的203个区县中,除张家口市两个区县为临界超载外,其他区县大气环境均处于超载状态,超载最为严重的区县主要集中在保定市、邢台市、邯郸市及衡水市等地。大气环境质量相对较好的区县主要集中在北部的承德、张家口等市。从单项指标看, $PM_{2.5}$ 为区域大气环境超载的首要影响因素, $PM_{10}$ 、 $O_3$ 、 $NO_2$ 环境形势也较为严峻。水环境承载力方面,参与评价的108个区县水环境均处于超载状态,超载最为严重的区县主要集中在沧州、邢台、廊坊及衡水等南部各市;水环境质量相对较好的区县主要集中在北部的承德、张家口等市,TN、DO、 $NH_3-N$ 和TP为主要的超标污染因子。

本文目前仅以京津冀地区为试点进行了环境承载力评价,但在环境承载力监测预警机制方面还有待深入研究。为此,建议国家应以京津冀地区为试点,联合发改委、环保、水利、交通、公安、气象等部门,建立完善环境承载能力监测预警机制,推动该项工作常态化开展。另外,还需加强经济社会活动—污染物排放—环境承载力变化输入响应决策机理、动态多目标决策模型研究,充分发挥环境承载力的指标作用,以承载力为约束,合理确定经济社会发展、产业规模、项目布局等,对区域协调发展管理目标、任务和主要内容进行适当调整,做到统一规划、整体布局、设施共建、资源共享、优势互补,以实现区域环境与社会经济的协调发展。

### 参考文献(References)

- 白辉, 高伟, 陈岩, 等. 2016. 基于环境容量的水环境承载力评价与总量控制研究[J]. 环境污染与防治, 38(4): 103-106, 110. [Bai H, Gao W, Chen Y, et al. 2016. Study on water environmental carrying capacity evaluation and gross control based on environmental capacity[J]. Environmental Pollution and Control, 38(4): 103-106, 110.]
- 段新光, 栾芳芳. 2014. 基于模糊综合评判的新疆水资源承载力评价[J]. 中国人口·资源与环境, 24(3): 119-122. [Duan X G, Luan F F. 2014. Evaluation of water resources carrying capacity in Xinjiang based on fuzzy comprehensive model[J]. China Population, Resources and Environment, 24(3): 119-122.]
- 樊杰, 王亚飞, 汤青, 等. 2015. 全国资源环境承载能力监测预警(2014版)学术思路与总体技术流程[J]. 地理科学, 35(1): 1-10. [Fan J, Wang Y F, Tang Q, et al. 2015. Academic thought and technical progress of monitoring and early-warning of the national resources and environment carrying capacity (V 2014)[J]. Scientia Geographica Sinica, 35(1): 1-10.]
- 高伟, 伊璇, 刘永, 等. 2016. 可持续性约束下开放流域系统氮磷环境承载力研究[J]. 环境科学学报, 36(2): 690-699. [Gao W, Yi X, Liu Y, et al. 2016. Environmental carrying capacity of nitrogen and phosphorus in an open watershed system under sustainability requirement[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 36(2): 690-699.]
- 李磊, 贾磊, 赵晓雪, 等. 2014. 层次分析—熵值定权法在城市水环境承载力评价中的应用[J]. 长江流域资源与环境, 23(4): 456-460. [Li L, Jia L, Zhao X X, et al. 2014. Application of the AHP and entropy weight method in evaluation on city water environmental carrying capacity[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 23(4): 456-



- 460.]
- 刘东, 封志明, 杨艳昭. 2012. 基于生态足迹的中国生态承载力供需平衡分析[J]. 自然资源学报, 27(4): 614-624. [Liu D, Feng Z M, Yang Y Z. 2012. Ecological balance between supply and demand in China using ecological footprint method[J]. *Journal of Natural Resources*, 27(4): 614-624.]
- 彭建, 吴健生, 潘雅婧, 等. 2012. 基于PSR模型的区域生态持续性评价概念框架[J]. 地理科学进展, 31(7): 933-940. [Peng J, Wu J S, Pan Y J, et al. 2012. Evaluation for regional ecological sustainability based on PSR model: Conceptual framework[J]. *Progress in Geography*, 31(7): 933-940.]
- 王传胜, 朱珊珊, 樊杰, 等. 2012. 主体功能区规划监管与评估的指标及其数据需求[J]. 地理科学进展, 31(12): 1678-1684. [Wang C S, Zhu S S, Fan J, et al. 2012. Key indicators and their data requirements for supervision and evaluation of MFOZ planning[J]. *Progress in Geography*, 31(12): 1678-1684.]
- 王春娟, 冯利华, 罗伟. 2012. 长三角经济区水资源承载力的综合评价[J]. 水资源与水工程学报, 23(4): 38-42. [Wang C J, Feng L H, Luo W. 2012. Comprehensive evaluation of carrying capacity of water resources in Yangtze River Delta [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 23(4): 38-42.]
- 王金南, 于雷, 万军, 等. 2013. 长江三角洲地区城市水环境承载力评估[J]. 中国环境科学, 33(6): 1147-1151. [Wang J N, Yu L, Wan J, et al. 2013. Assessment on water environmental carrying capacity in the Yangtze River Delta[J]. *China Environmental Science*, 33(6): 1147-1151.]
- 王奎峰, 李娜, 于学峰, 等. 2014. 基于P-S-R概念模型的生态环境承载力评价指标体系研究: 以山东半岛为例[J]. 环境科学学报, 34(8): 2133-2139. [Wang K F, Li N, Yu X F, et al. 2014. Eco-environmental carrying capacity evaluation index system based on the concept of P-S-R model: A case study in Shandong Peninsula[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 34(8): 2133-2139.]
- 王西琴, 高伟, 曾勇. 2014. 基于SD模型的水生态承载力模拟优化与例证[J]. 系统工程理论与实践, 34(5): 1352-1360. [Wang X Q, Gao W, Zeng Y. 2014. Methods and case study on water ecological carrying capacity using SD model[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 34(5): 1352-1360.]
- 徐琳瑜, 康鹏, 刘仁志. 2013. 基于突变理论的工业园区环境承载力动态评价方法[J]. 中国环境科学, 33(6): 1127-1136. [Xu L Y, Kang P, Liu R Z. 2013. Dynamic evaluation on environmental carrying capacity of industrial park with catastrophe progression method[J]. *China Environmental Science*, 33(6): 1127-1136.]
- 薛文博, 付飞, 王金南, 等. 2014. 基于全国城市PM<sub>2.5</sub>达标约束的大气环境容量模拟[J]. 中国环境科学, 34(10): 2490-2496. [Xue W B, Fu F, Wang J N, et al. 2014. Modeling study on atmospheric environmental capacity of major pollutants constrained by PM<sub>2.5</sub> compliance of Chinese cities [J]. *China Environmental Science*, 34(10): 2490-2496.]
- 姚士谋, 张平宇, 余成, 等. 2014. 中国新型城镇化理论与实践问题[J]. 地理科学, 34(6): 641-647. [Yao S M, Zhang P Y, Yu C, et al. 2014. The theory and practice of new urbanization in China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 34(6): 641-647.]
- 叶龙浩, 周丰, 郭怀成, 等. 2013. 基于水环境承载力的沁河流域系统优化调控[J]. 地理研究, 32(6): 1007-1016. [Ye L H, Zhou F, Guo H C, et al. 2013. Optimal regulation of Qinghe River watershed system based on water carrying capacity[J]. *Geographical Research*, 32(6): 1007-1016.]
- 曾维华, 等. 2014. 环境承载力理论、方法及应用[M]. 北京: 化学工业出版社. [Zeng W H, et al. 2014. *Huanjing chengzaili lilun, fangfa ji yingyong*[M]. Beijing, China: Chemical Industry Press.]
- 张会涓, 陈然, 赵言文. 2012. 基于模糊物元模型的区域水环境承载力研究[J]. 水土保持通报, 32(2): 186-189. [Zhang H J, Chen R, Zhao Y W. 2012. Regional carrying capacity of water environment based on fuzzy matter-element model[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 32(2): 186-189.]
- Clarke A L. 2002. Assessing the carrying capacity of the Florida keys[J]. *Population and Environment*, 23(4): 405-418.
- Gong L, Jin C L. 2009. Fuzzy comprehensive evaluation for carrying capacity of regional water resources[J]. *Water Resources Management*, 23(12): 2505-2513.
- Li N, Yang H, Wang L C, et al. 2016. Optimization of industry structure based on water environmental carrying capacity under uncertainty of the Huai River Basin within Shandong Province, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 112: 4594-4604.
- Peng J, Du Y Y, Liu Y X, et al. 2016. How to assess urban development potential in mountain areas? An approach of ecological carrying capacity in the view of coupled human and natural systems[J]. *Ecological Indicators*, 60: 1017-1030.
- Peng J, Wang Y L, Wu J S, et al. 2011. Research progress on evaluation frameworks of regional ecological sustainability [J]. *Chinese Geographical Science*, 21(4): 496-510.
- Wackernagel M, Yount J D. 1998. The ecological footprint: An indicator of progress toward regional sustainability[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 51(1-2): 511-529.

- Wang W Y, Zeng W H. 2013. Optimizing the regional industrial structure based on the environmental carrying capacity: An inexact fuzzy multi-objective programming model[J]. *Sustainability*, 5(12): 5391-5415.
- Wei C, Guo Z Y, Wu J P, et al. 2014. Constructing an assessment indices system to analyze integrated regional carrying capacity in the coastal zones: A case in Nantong[J]. *Ocean & Coastal Management*, 93: 51-59.
- Sutton P C, Anderson S J, Tuttle B T, et al. 2012. The real wealth of nations: Mapping and monetizing the human ecological footprint[J]. *Ecological Indicators*, 16: 11-22.
- Yang J F, Lei K, Khu S, et al. 2015. Assessment of water environmental carrying capacity for sustainable development using a coupled system dynamics approach applied to the Tieling of the Liao River Basin, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 73(9): 5173-5183.
- Zeng W H, Wu B, Chai Y. 2016. Dynamic simulation of urban water metabolism under water environmental carrying capacity restrictions[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 10(1): 114-128.
- Zheng D F, Zhang Y, Zang Z, et al. 2015. Empirical research on carrying capacity of human settlement system in Dalian City, Liaoning Province, China[J]. *Chinese Geographical Science*, 25(2): 237-249.

## Environmental carrying capacity evaluation methods and application based on environmental quality standards

LIU Nianlei, LU Yaling, JIANG Hongqiang\*, CHENG Xi

(Chinese Academy of Environment Planning, State Environmental Protection Key Laboratory of Environmental Planning and Policy Simulation, Beijing 100012, China)

**Abstract:** Establishing the monitoring and early-warning mechanism of resource and environmental carrying capacity is an innovative work of comprehensive and deepening reforms of China. This research proposed an evaluation model of environmental carrying capacity based on environmental quality standards. This model measures the carrying capacity of atmospheric, water, and the whole environment through calculating the exceeding standard value index of pollutant concentration, and the Beijing-Tianjin-Hebei region was used as the pilot study area. The conclusions are as follows: (1) The evaluation results of the pilot study area show that 99% of the districts were in the status of overloading. (2) With regard to atmospheric environmental carrying capacity, 98% of the districts were in the status of overloading with  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  as the main pollutants. The concentrations of  $O_3$  and  $NO_2$  also seriously exceeded the values specified in the standards—87% and 72% of the districts were in the status of overloading with these two pollutants, respectively. (3) With respect to water environmental carrying capacity, all 108 districts were in the status of overloading with TN, DO,  $NH_3-N$ , and TP as the main pollutants. This evaluation model objectively reflects the state of environmental carrying capacity based on the environmental quality. It can potentially be widely applied to the evaluation of environmental carrying capacity in different regions.

**Key words:** environmental carrying capacity; pollutant concentration; environmental quality standard; exceeding standard value index; Beijing-Tianjin-Hebei region