

DOI: 10.5846/stxb202201230222

束承继, 孟 菡, 韩宝龙, 杨红龙, 潘雪莲, 林立, 欧阳志云. 降雨因素对生态系统生产总值核算结果的影响. 生态学报, 2023, 43(3): 1054-1063.

Shu C J, Meng H, Han B L, Yang H L, Pan X L, Lin L, Ouyang Z Y. Impact of precipitation factors on gross ecosystem product. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(3): 1054-1063.

## 降雨因素对生态系统生产总值核算结果的影响

束承继<sup>1,2</sup>, 孟 菡<sup>3</sup>, 韩宝龙<sup>1,\*</sup>, 杨红龙<sup>4</sup>, 潘雪莲<sup>1,2,5</sup>, 林 立<sup>6</sup>, 欧阳志云<sup>1</sup>

1 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 联合国环境规划署世界保护监测中心, 剑桥 CB3 0DL

4 深圳市气象局, 深圳 518040

5 深圳市环境科学研究院, 深圳 518022

6 福建农林大学园林学院, 福州 350002

**摘要:**目前生态系统生产总值(GEP)核算工作已在全国多地开展,并在不少地方已将其纳入政绩考核指标,但 GEP 核算中相关生态系统服务多基于实际降雨数据和多年平均降雨数据,导致在进行年际间 GEP 变化分析时,结果难以反应实际的生态系统质量和数量的变化,从而影响 GEP 管理应用的效果。本文以深圳为研究案例,提出了更能代表本地降雨一般化特征的可比降雨条件,以及基于主成分分析的确定方法,并且在可比降雨条件和实际降雨条件下核算了可比降雨年和临近年共 3 种情景下的生态系统生产总值(GEP),分析了不同情景下的 GEP 构成以及降雨因素对年际间 GEP 变化的影响能力。研究发现:(1)2019 年为深圳可比降雨年,且符合 2008—2020 年间各年《深圳市气候公报》对降雨情况的阐述;(2)可比降雨条件下,与降雨相关的 4 项生态系统服务价值(减少泥沙淤积、减少面源污染、涵养水源、削减洪涝)呈年际间增长趋势,实际降雨条件下,减少泥沙淤积、减少面源污染价值增长,涵养水源、削减洪涝价值下降;(3)降雨因素显著影响 GEP 年际变化,不同降雨条件下,深圳 2019—2020 年 GEP 变化差异高达 24.78 亿元,而可比降雨条件可以有效减少非人为因素对 GEP 变化的影响;(4)计算多年平均降雨过程中,数据“峰度”会被人为降低的,导致平均结果不能代表地区典型气候特征;(5)可比降雨条件下,年际间 GEP 变化特征更能反应生态系统质量和数量的实际变化特征。研究结果可为今后面向管理应用的 GEP 核算提供新的思路与方法。

**关键词:**气象;生态系统生产总值(GEP);可比降雨条件;深圳

## Impact of precipitation factors on gross ecosystem product

SHU Chengji<sup>1,2</sup>, MENG Han<sup>3</sup>, HAN Baolong<sup>1,\*</sup>, YANG Honglong<sup>4</sup>, PAN Xuelian<sup>1,2,5</sup>, LIN Li<sup>6</sup>, OUYANG Zhiyun<sup>1</sup>

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 World Conservation Monitoring Centre, United Nations Environment Programme, Cambridge CB3 0DL, United Kingdom

4 Meteorological Bureau of Shenzhen Municipality, Shenzhen 518040, China

5 Shenzhen Academy of Environmental Sciences, Shenzhen 518022, China

6 College of horticulture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

**Abstract:** The accounting of Gross Ecosystem Product (GEP) has been conducted in many cities across the country, which has been included in the performance assessment indicators. But the relevant ecosystem services in GEP accounting are

**基金项目:**国家自然科学基金青年项目(71804180);《深圳市 2020 年各区 GEP 核算项目》

**收稿日期:**2022-01-23; **网络出版日期:**2022-10-11

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: blhan@rcees.ac.cn

mostly based on actual precipitation data and multi-year average precipitation data, which makes it difficult to reflect the actual changes in ecosystem quality and quantity when analyzing inter-annual GEP changes, thus affecting the application of GEP management. Taking Shenzhen as a case, this paper proposes the comparable precipitation conditions that are more representative of the generalized characteristics of local precipitation, and a method of determination based on principal component analysis. This paper calculates the GEP for two adjacent years under comparable and actual precipitation conditions, for a total of three scenarios, and analyses the composition of GEP under different scenarios and the ability of precipitation factors to influence inter-annual GEP variability. The study found that: (1) 2019 was a comparable precipitation year in Shenzhen and was consistent with the precipitation situation described in the Shenzhen Climate Bulletin between 2008 and 2020; (2) The four ecosystem service values associated with precipitation (Sedimentation reduction, Non-point resource pollution retention, Water conservation and Flood reduction) showed an inter-annual increase under comparable precipitation conditions, while the values of Sedimentation reduction and Non-point resource pollution retention increased and the values of Water conservation and Flood reduction decreased under actual precipitation conditions; (3) Precipitation factors significantly affected the interannual variation of GEP, and the variation of GEP change in Shenzhen from 2019 to 2020 under different precipitation conditions was as high as RMB 2.478 billion, while comparable precipitation conditions could effectively reduce the influence of non-anthropogenic factors on GEP change; (4) In the process of calculating multi-year average precipitation, the “kurtosis” of the data would be artificially reduced, resulting in the results not representing the typical climate characteristics of the region; (5) Under comparable precipitation conditions, the inter-annual GEP variation characteristics better reflected the actual variation of ecosystem quality and quantity. The results of the study may provide new ideas and methods for future GEP accounting for management applications.

**Key Words:** meteorology; gross ecosystem product(GEP); comparable precipitation conditions; shenzhen

生态系统生产总值(Gross Ecosystem Product,以下简称 GEP)这一概念最早由中国科学院生态环境研究中心欧阳志云及世界自然保护联盟(IUCN)朱春全等人共同提出,它是指一定时期一定区域内自然生态系统为人类福祉和经济社会可持续发展提供的各种最终产品与服务的货币价值的总和<sup>[1-2]</sup>。GEP 将自然生态系统对人类的贡献用人类社会的价值方法进行评价,有效的提升了人类对自然生态系统价值的认识,架起了沟通生态环境保护与社会经济发展的价值评估桥梁。

为此,联合国环境经济核算委员会在 2021 年 6 月将 GEP 纳入最新的国际统计标准环境经济核算体系-生态系统核算(SEEA-EA)<sup>[3]</sup>中;我国中共中央办公厅、国务院办公厅 2021 年 4 月印发《关于建立健全生态产品价值实现机制的意见》<sup>[4]</sup>,强调要制定生态产品价值核算规范,并探索将生态产品纳入国民经济核算体系和政绩考核体系,间接为生态系统生产总值(GEP)的研究提出了要求;此外,多个省市相继出台了地方 GEP 核算标准<sup>[5-8]</sup>,不少地方还探索将 GEP 与生态补偿、自然资源有偿使用、自然资源资产离任审计、生态文明绩效考核等工作进行衔接,充分说明了 GEP 核算工作在当前生态环境与自然资源管理工作中的重要性。

在现行的 GEP 核算方法中,降雨因素直接参与了多个生态系统服务核算过程,如水源涵养、土壤保持(一些地区称之减少泥沙淤积和面源污染控制)、洪涝削减(一些地区称之暴雨径流调节)等<sup>[9-11]</sup>。以深圳 2020 年官方发布 GEP 核算结果为例,这几项生态系统调节服务价值占总 GEP 高达 15.58%。但是以管理为导向的 GEP 核算与应用,更多的关注在年际间人的生产生活活动造成的 GEP 变化,而降雨因素在短期内和局地尺度上受人因素为影响十分有限。因此,科学控制降雨因素对提升 GEP 核算结果在管理应用中的有效性十分重要。

目前学界多采用多年平均降雨量来进行相关生态产品价值核算研究,如欧阳志云、董天、杨渺等均在各自的 GEP 核算研究中基于多年平均降雨数据,对核算指标体系中的水源涵养、土壤保持、洪涝削减三项服务进行了核算<sup>[12-14]</sup>,Catherine Frizzle<sup>[15]</sup>基于多年平均降雨数据利用 SWAT 模型模拟了位于加拿大纽芬兰西部的

哈里河流域的产沙量, Ju Shen 等<sup>[16]</sup>以上海为例,在城市尺度上基于多年平均降雨数据评估了生态系统洪涝削减服务的供需特征, Ping Li 等<sup>[17]</sup>在评估黄河流域气候、植被和水库影响下的洪水调节生态系统服务时,也使用了多年平均降雨数据。但是,多年平均降雨数据易受个别年份极端监测数据影响,难以反应地区典型气候情况(比如以暴雨判定标准为例,某日在过去 30 年中有 29 年降雨达到 50mm,其中一年降雨仅 49mm,则该日在多年平均降雨数据统计结果中被判定为非暴雨日)。

本文以深圳为例,提出了更能代表本地降雨一般化特征的“可比降雨条件”的概念以及确定方法,在现有《深圳市生态系统生产总值核算技术规范》(DB4403)框架下<sup>[7]</sup>,评估了可比降雨条件和实际降雨条件下深圳市两年三种情景的生态系统服务功能量和价值量,分析了降雨条件对 GEP 年际间差异的影响。基于可比降雨条件开展面向生态管理应用的 GEP 核算时,可以减少非人为因素的干扰,使核算结果更能反应实际的生态质量变化,以期为今后面向管理应用的 GEP 核算提供新的思路与方法。

## 1 研究区概况

深圳市是我国南部沿海重要城市,位于广东省南部,珠江口东岸,是粤港澳大湾区四大中心城市之一。深圳陆域面积 1997.47km<sup>2</sup>,其中建设用地面积 1005.95km<sup>2</sup><sup>[18]</sup>。深圳属于南亚热带季风气候区,雨季集中在每年的 4—9 月份,年均降雨量 1933.3mm<sup>[19]</sup>,从近 30 年深圳国家基本站气象监测数据看,2001 年累计降雨量最高达 2747mm,2011 年累计降雨量最低为 1269.7mm,年际间波动幅度较大(图 1);暴雨天数 2001 年最高为 18 天,2012 年最少仅 3 天,年际间也存在较大差异(图 1)。此外,深圳市提出将 GEP 纳入当地的政绩考核机制,因此对消除降雨因素对 GEP 的影响具有迫切的现实需求。

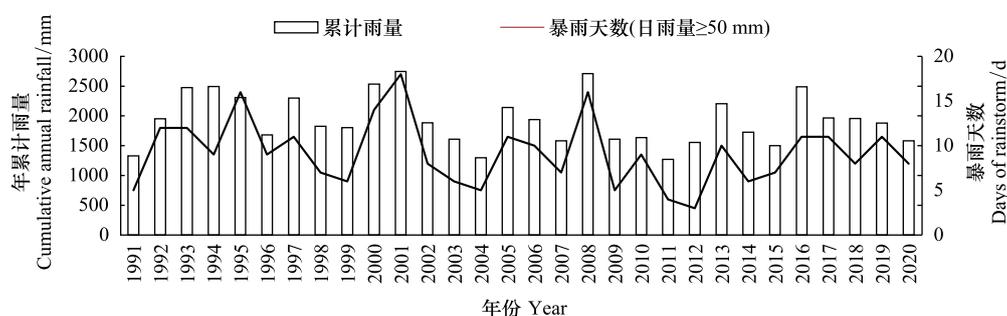


图 1 深圳市近 30 年平均累计降雨量

Fig.1 Cumulative annual precipitation in Shenzhen over the past 30 years

## 2 技术路线与研究方法

### 2.1 技术路线

本文研究降雨因素对生态系统生产总值(GEP)的影响,重点关注可比降雨条件下年际间 GEP 变化情况与实际降雨条件下年际间 GEP 变化情况的差异,技术路线如图 2。先基于已有降雨特征数据利用主成分分析法确定可比降雨年,以可比降雨年的降雨数据作为可比降雨条件(同样也是当年的实际降雨条件),计算当年的生态系统生产总值(GEP),作为情景 A;再以“可比降雨条件”计算临近年的生态系统生产总值(GEP),作为情景 B;最后以临近年的降雨数据计算临近年的生态系统生产总值(GEP),作为情景 C。最后分析 3 种情景下的 GEP 构成特征,并通过分析情景 A 与情景 B 之间的变化情况、情景 A 与情景 C 之间的变化情况,探讨不同降雨数据条件下 GEP 年际变化的差异性,并在管理考核应用层面,讨论可比降雨条件相较于实际降雨条件和多年平均降雨条件的适用性。

### 2.2 生态系统生产总值核算指标体系及方法

深圳市于 2021 年 3 月正式发布实施了《深圳市生态系统生产总值核算技术规范》(DB4403),明确了 3 项

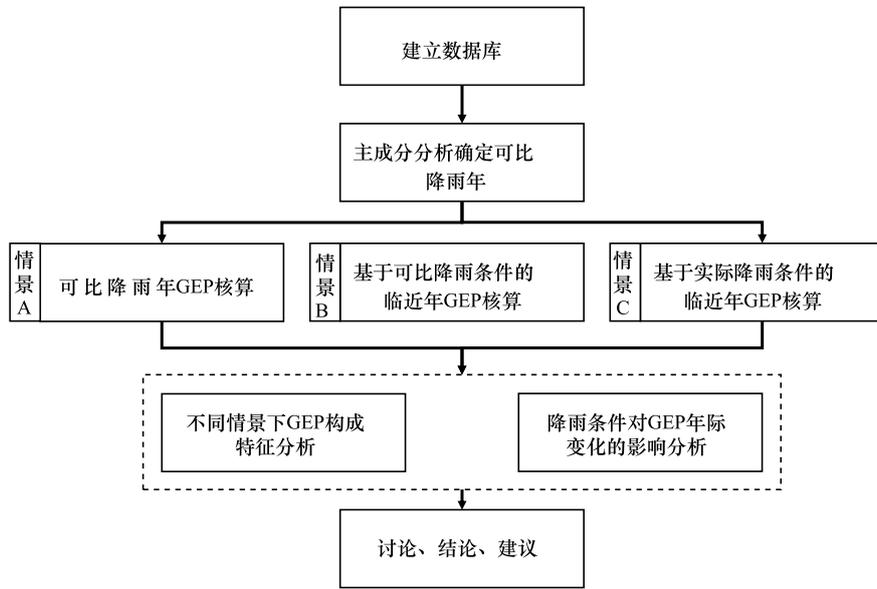


图 2 技术路线图

Fig.2 Technology Roadmap

GEP, 生态系统生产总值 Gross ecosystem product

一级指标、16 项二级指标的指标内涵、核算方法、数据要求、定价方案等信息<sup>[7]</sup>。其中减少泥沙淤积、减少面源污染、削减洪涝、涵养水源 4 项服务核算涉及降雨数据(表 1)。

表 1 深圳市 GEP 指标体系中与降雨相关的指标及核算

Table 1 Precipitation-related indicators and accounting methods in the Shenzhen GEP indicator system

指标 Indicator	功能量核算方法 Calculation method of bio-physical value	价值量核算方法 Calculation method of monetary value
减少泥沙淤积 Sedimentation reduction	在产流降雨条件下,由通用土壤流失方程计算得出土壤保持量,再乘以泥沙形成系数。	利用土方清运成本计算减少泥沙淤积价值。
减少面源污染 Non-point resource pollution retention	减少泥沙淤积量乘以单位重量泥沙中的面源污染物含量。	利用污染物治理成本计算减少面源污染价值。
削减洪涝 Flood reduction	在城市范围内利用 SCS 模型计算指标削减径流量;以及利用监测数据计算湖泊、水库的滞留水量。	城区植被暴雨径流调节价值基于海绵城市蓄水建设成本计算;郊野植被暴雨径流调节价值和水库洪水调蓄价值基于水库单位库容造价和管养费用计算。
涵养水源 Water conservation	本地降雨量减去径流量,再减去蒸散发量。	基于水库单位库容造价计算涵养水源价值。

GEP, 生态系统生产总值, gross ecosystem product

### 2.3 可比降雨条件确定方法

可比降雨条件作为生态系统生产总值(GEP)核算的统一降雨基准数据,需选择近年来极端降雨天气较少、降雨特征一般化明显的年份,相较于传统的实际降雨条件和多年平均降雨条件,将该年逐日降雨数据作为可比降雨条件用于 GEP 核算,即能综合反应地区典型气候特征,又能避免多年平均降雨数据中个别年份数据的突出影响。描述某年降雨特征的指标很多,如累计雨量、降雨天数、暴雨天数(日雨量≥50mm)、强降雨天数(1h 降雨量≥20mm)等,如何综合考虑各项指标确定可比降雨年份是方法应用的考虑重点。本文利用 IBM SPSS Statistics 23 软件中主成分分析模块基于深圳市 2008—2020 年国站降雨监测数据进行可比降雨条件的确定,考虑累计雨量、降雨天数、暴雨天数(日雨量≥50mm)、强降雨天数(1h 降雨量≥20mm)4 个参数(表 2)。理想状态下选取的分析期因为 30 年,但受于深圳本地气象站建设和气候公报发布情况的影响,

2008 年起相关设施和制度才完全建立,为保持数据口径的一致性,本文的研究期选为 2008 年至 2020 年。

表 2 深圳国家基本站 2008—2020 年降雨特征

Table 2 Precipitation Characteristics of Shenzhen National Basic Station from 2008 to 2020

年份 Year	累计雨量 Rainfall/mm	降雨天数(日雨量 $\geq 0.1\text{mm}$ ) Days of precipitation/day	暴雨天数(日雨量 $\geq 50\text{mm}$ ) Days of rainstorm/day	强降雨天数(1 小时雨量 $\geq 20\text{mm}$ ) Days of strong rainfall/day
2008	2710.0	132	16	19
2009	1611.0	118	5	12
2010	1634.0	124	9	9
2011	1269.7	115	4	8
2012	1554.8	142	3	9
2013	2203.6	129	10	13
2014	1725.5	129	6	13
2015	1500.8	123	7	8
2016	2490.6	153	11	20
2017	1967.1	127	11	19
2018	1957.2	121	8	16
2019	1880.1	125	11	13
2020	1581.8	126	8	11

主成分分析即 Principal Component Analysis(简称 PCA)是由卡尔(Karl)和皮尔逊(Pearson)最早在 1901 年提出<sup>[20]</sup>,在涉及指标降维的国内外生态学研究中被广泛应用<sup>[21-26]</sup>。主成分分析法的工作目标,就是在力保数据信息丢失最小的原则下,对高维变量空间进行降维处理;即在保证数据信息损失最小的前提下,经线性变换和舍弃一小部分信息,以少数的综合变量取代原始采用的多维变量。设原变量为  $X_1, X_2, \dots, X_J$ , 主成分分析后得到的新变量为  $Z_1, Z_2, \dots, Z_m$ , 均是  $X_1, X_2, \dots, X_J$  的线性组合 ( $m < J$ )。变量  $Z_1, Z_2, \dots, Z_m$  构成的坐标系是在原坐标系经平移和正交旋转后得到的,称  $Z_1, Z_2, \dots, Z_m$  张成的空间为  $m$  维主超平面。在主超平面上,第一主成分  $Z_1$  对应于数据变异最大的方向,对于  $Z_2, \dots, Z_m$ , 依次有  $V(Z_1) \geq V(Z_2) \geq \dots \geq V(Z_m)$ , 因此,  $Z_1$  是携带原数据信息最多的一维变量,而  $m$  维主超平面是保留原始数据信息量最大的  $m$  维子空间。

主成分分析步骤如下<sup>[27]</sup>:

- (1) 数据的标准化处理,可消除变量在数量级或量纲上的影响;
- (2) 根据标准化后的数据矩阵求出相关性矩阵,判定数据主成分分析的可行性;
- (3) 求相关性矩阵的所有特征值,按从大到小排列,选取特征值大于 1 的成分作为主成分;
- (4) 求主成分得分系数矩阵。

## 2.4 数据来源

受降雨影响的 GEP 指标(减少泥沙淤积、减少面源污染、削减洪涝、涵养水源)所涉及的中核算所需数据较多,包括地理信息数据、统计公报数据两大类,主要数据来源如下:(1)地理信息类。生态系统分类数据来源于深圳市生态环境局,行政区边界矢量、归一化植被指数 NDVI 数据来源于深圳市陆域生态调查评估项目成果,植被蒸散 ET 数据、净初级生产力 NPP 数据来源于 MODIS 卫星数据,土壤类型容重、质地组成数据来源于南京土壤所 1:100 万土壤数据,水库空间信息数据来源于深圳市水务局。(2)统计公报数据。降雨站点逐日监测数据由深圳市气象局提供。

## 3 研究结果

### 3.1 可比降雨条件分析结果

IBM SPSS Statistics 23 软件中主成分分析模块自带标准化处理功能<sup>[28]</sup>,基于标准化处理后的数据进行相关性矩阵分析,结果见表 3。不难发现各指标间存在较高的相关性,且总体显著性较高,说明指标间信息存在

高度重叠以及降维的必要性,且 KMO 取样适切性量数高于 0.5,巴特利特球形度检验显著性小于 0.001,说明数据可进行主成分分析<sup>[29]</sup>(表 4)。

表 3 近十三年来的四项降雨指标的相关性矩阵

Table 3 Correlation matrix of the four precipitation indicators for the last thirteen years

指标 Indicator		累计雨量 Rainfall	降雨天数 Days of precipitation	暴雨天数 Days of rainstorm	强降雨天数 Days of strong rainfall
相关性 Correlation	累计雨量	1.0000	0.5568 *	0.8510 ***	0.8624 ***
	降雨天数	—	1.0000	0.2541	0.4603
	暴雨天数	—	—	1.0000	0.7263 **
	强降雨天数	—	—	—	1.0000

\*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$ ; \*\*\*  $P < 0.001$

SPSS 分析总方差解释见表 5,四项成分中,初始特征值从大到小排列,提取初始特征值大于 1 的成分作为主成分,该成分可解释总体指标 72.8676% 的信息<sup>[30]</sup>。该成分得分系数矩阵见表 6,得到各指标与主成分的关系为:

$$Z = 0.3346 x_1 + 0.2121 x_2 + 0.2960 x_3 + 0.3140 x_4$$

式中, $Z$  为降维后主成分, $x_1$  为累计雨量指标, $x_2$  为降雨天数指标, $x_3$  为暴雨天数指标, $x_4$  强降雨天数指标。

利用降维公式对各年的降雨特征进行评价,并计算评价结果较平均值的偏离度,偏离度最小的一年即为可比气象年,结果见图 3。可知 2019 年降维后的偏离度最小,为可比降雨年,该年逐日降雨数据即可比降雨条件。

$$\rho_i = |Z_i - Z_m| / Z_m$$

式中, $\rho_i$  为第  $i$  年的偏离度; $Z_i$  为第  $i$  年的降维后主成分结果, $Z_m$  为所有年份降维后主成分结果的平均值。

表 5 总方差解释

Table 5 Explanation of total variance

成分 Component	初始特征值 Eigenvalue			提取载荷平方和 Extraction sums of squared loadings		
	总计	方差百分比	累积/%	总计	方差百分比	累积/%
1	2.9147	72.8676	72.8676	2.9147	72.8676	72.8676
2	0.7785	19.4637	92.3313	—	—	—
3	0.2404	6.0112	98.3425	—	—	—
4	0.0663	1.6575	100.0000	—	—	—

表 6 成分得分系数矩阵

Table 6 Matrix of component score coefficients

成分 Component	累计雨量 Rainfall	降雨天数 Days of precipitation	暴雨天数 Days of rainstorm	强降雨天数 Days of strong rainfall
1	0.3346	0.2121	0.2960	0.3140

### 3.2 生态系统生产总值(GEP)评估

在保持生态系统服务定价不变的情况下,以可比降雨年 2019 年降雨条件,分别核算深圳 2019 年度(情景 A)和 2020 年度 GEP(情景 B);以 2020 年降雨条件核算 2020 年度 GEP(情景 C),在情景 B 和情景 C 中对于不涉及降雨因素的 GEP 指标,其核算结果不变。3 种情景的降雨相关生态系统服务及 GEP 核算结果如下表 7:

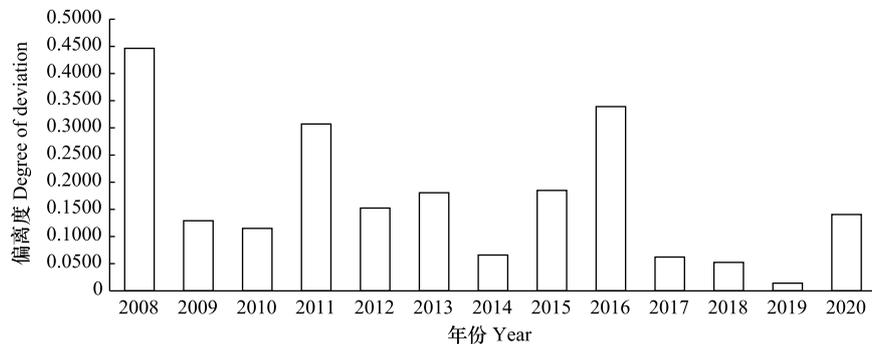


图3 各年主成分结果较主成分平均值偏离度

Fig.3 Deviation of principal component results from the mean for each year

表7 两年3种情景下GEP核算结果

Table 7 GEP accounting results under 3 scenarios for 2 years

指标 Indicator	情景 A/亿元 Scenario A/ billion RMB	情景 B/亿元 Scenario B/ billion RMB	情景 C/亿元 Scenario C/ billion RMB
GEP 总值 Gross ecosystem product *	1321.26	1303.82	1279.04
调节服务 Regulation services *	680.47	699.52	674.74
减少泥沙淤积 Sedimentation reduction	1.39	1.40	1.97
减少面源污染 Non-point resource pollution retention	15.18	15.23	21.51
削减洪涝 Flood reduction	67.07	69.23	65.24
涵养水源 Water conservation	116.43	117.19	89.55

\* 年际间 GEP 总量和调节服务价值总量变化还受到其他非降雨因素的影响,因此此处进行年际间的变化比较没有意义

情景 A:深圳市 2019 年生态系统生产总值(GEP)共计 1321.26 亿元。其中调节服务 680.47 亿元,占比 51.50%,为主要构成部分。调节服务中与降雨相关的减少泥沙淤积、减少面源污染、削减洪涝和涵养水源 4 项服务价值量分别为 1.39 亿元、15.18 亿元、67.07 亿元和 116.43 亿元,分别占 GEP 总量 0.11%、1.15%、5.08% 和 8.81%,累计占比 15.15%。

情景 B:可比降雨条件下,深圳市 2020 年生态系统生产总值(GEP)共计 1303.82 亿元。其中调节服务 699.52 亿元,占该年 GEP 总量的 53.70%,为主要构成部分,较 2019 年增长 2.80%;调节服务中与降雨相关的减少泥沙淤积、减少面源污染、削减洪涝和涵养水源 4 项服务价值量分别为 1.40 亿元、15.23 亿元、69.23 亿元和 117.19 亿元,分别占 GEP 总量 0.11%、1.17%、5.31% 和 8.99%,累计占比 15.58%。

情景 C:实际降雨条件下,深圳市 2020 年生态系统生产总值(GEP)共计 1279.04 亿元。其中调节服务价值量 674.74 亿元,占当年 GEP 总价值量的 52.8%,为主要构成部分,较 2019 年该项价值量降低了 3.54%。调节服务中与降雨相关的减少泥沙淤积、减少面源污染、削减洪涝和涵养水源 4 项服务价值量分别为 1.97 亿元、21.51 亿元、65.24 亿元和 89.55 亿元,分别占 GEP 总量 0.15%、1.68%、5.10% 和 7.00%,累计占比 13.93%。

### 3.3 两种降雨条件下相关服务年际变化特征及差异分析

基于 3 种情景 GEP 核算结果计算两种降雨条件下相关生态系统服务(减少泥沙淤积、减少面源污染、涵养水源、削减洪涝)的年际变化情况,见表 8。

可比降雨条件下,相较于 2019 年,2020 年生态系统生产总值(GEP)与降雨有关的 4 项调节服务中,减少泥沙淤积服务增加 0.01 亿元,减少面源污染增加 0.05 亿元,涵养水源服务增加 0.76 亿元,削减洪涝服务增加 2.16 亿元;实际降雨条件下,相较于 2019 年,2020 年生态系统生产总值(GEP)与降雨有关的 4 项调节服务中,减少泥沙淤积服务增加 0.58 亿元,减少面源污染增加 6.33 亿元,涵养水源服务降低 26.88 亿元,削减洪涝服务降低 1.83 亿元;不同降雨条件下,4 项服务变化幅度分别为 +0.57 亿元、+6.28 亿元、-27.64 亿元和

-3.99 亿元,其中涵养水源服务和削减洪涝服务的年际变化趋势甚至出现了方向性改变,由可比降雨条件下的年际间增加变为实际降雨条件下的年际间下降,从而导致最能反应生态系统质量变化特征的调节服务总价值量的年际变化也出现了类似的现象,最终由降雨条件引起的年际间调节服务价值量和 GEP 总量变化差异为 24.78 亿元。

表 8 两种降雨条件下 2019—2020 年相关生态系统服务变化

Table 8 Changes in associated ecosystem services for 2019—2020 under two precipitation conditions

指标名称 Indicator	可比降雨条件下价值量 年际变化(亿元) (情景 B-情景 A) Change in monetary value under comparable precipitation conditions	实际降雨条件下价值量 年际变化(亿元) (情景 C-情景 A) Change in monetary value under actual precipitation conditions	2020 年实际 GEP 中降雨 引起波动情况(亿元) (情景 C-情景 B) The influence of precipitation factors in the interannual change of GEP
GEP 总量*	—	—	-24.78
Gross ecosystem product	—	—	-24.78
调节服务*	—	—	-24.78
Regulation services	—	—	-24.78
减少泥沙淤积	0.01	0.58	0.57
Sedimentation reduction	0.01	0.58	0.57
减少面源污染	0.05	6.33	6.28
Non-point resource pollution retention	0.05	6.33	6.28
涵养水源	0.76	-26.88	-27.64
Water conservation	0.76	-26.88	-27.64
削减洪涝	2.16	-1.83	-3.99
Flood reduction	2.16	-1.83	-3.99

\* 年际间 GEP 总量和调节服务价值总量变化还受到其他非降雨因素的影响,因此此处进行年际间的变化比较没有意义

## 4 讨论

### 4.1 本文研究结果与气象部门相关观点保持一致

基于深圳气象局提供的 2008—2020 年国家基本站详细降雨特征数据,综合考虑累计雨量、降雨天数、暴雨天数和强降雨天数 4 项指标,经主成分分析降维后提取了一个主成分,计算 2008—2020 年各主成分结果距平均值的偏离度后,发现 2019 年主成分计算结果距平均值偏离度最小。对比 2008—2020 年间各年《深圳市气候公报》<sup>[31]</sup>,发现对 2019 年深圳天气描述为“开汛偏早、龙舟水重,雷雨大风强、台风影响弱,全年气温高、秋冬干燥长等气候特点,属于一般气候年景”。这与本文主成分分析结果相一致,佐证了本文分析方法和结论的可靠性。

### 4.2 相较实际降雨条件,可比降雨条件可以有效减少非人为因素对 GEP 变化的影响

在面向考核和管理开展 GEP 核算时,需要尽力减少非人为因素对 GEP 变化的影响。研究对比两种降雨条件下 2019—2020 年相关生态系统服务的变化量,发现相较于可比降雨条件下的减少泥沙淤积、减少面源污染两类服务的年际增长幅度,实际降雨条件下,年际增长量更高;而相较于可比降雨条件下的涵养水源、削减洪涝两类服务的年际增长,实际降雨条件下,年际变化趋势却变为显著下降。最终由降雨条件不同引起的 GEP 年际变化波动高达 24.78 亿元,说明了降雨条件对年际间 GEP 变化特征影响较大,而使用可比降雨条件可有效减少非人为因素对 GEP 变化的影响。

### 4.3 相较多年平均降雨条件,可比降雨条件更加符合管理应用需求

目前的 GEP 核算和生态系统服务研究多基于多年平均降雨数据,但存在一定的局限性。以华南地区某站点为例,搜集该站点 31 年逐日降雨数据计算得到多年平均降雨数据后发现,多年平均降雨条件下全年没有一天达到暴雨日标准(日降雨超过 50mm),实际上,31 年间(365 日×31 年)共出现了 272 个暴雨日,暴雨次数在 1—12 月大致成正态分布(图 4),符合该站点所在地“夏季高温多雨、冬季温和少雨”的亚热带季风气候特征,而多年平均降雨条件显然无法反应地区典型气候情况。原因在于暴雨日属于非典型气象现象,尤其是对

于某一天来说,该日降雨数据经过长时间序列的平均后,数据“峰度”会被人为降低的,导致平均结果并不能代表该地区“夏季高温多雨,冬季温和少雨”的典型气候特征;而可比降雨条件的应用则避免了这种情况,更加符合管理应用需求。

#### 4.4 可比降雨条件下,深圳 GEP 年际变化主要由于生态质量变化引起

相较于实际降雨条件,基于可比降雨条件的 GEP 核算结果,更能反映年际间的生态系统质量变化特征。实际降雨条件下,2020GEP 较 2019 年 GEP 降低 3.20%,除去因疫情影响而显著降低的旅游休闲服务价值外,更能反应生态质量特征的调节服务价值同样下降了 3.54%;可比降雨条件下,虽然在疫情的影响下,受显著降低的旅游休闲服务影响 2020 年 GEP 较 2019 年依然下降了 1.32%,但调节服务却上升了 2.80%;进一步利用 ArcGIS 10.6 分区统计工具统计 2019 年和 2020 年各生态空间类型上的 NPP 年总值和平均值(图 5),不难发现,农田、森林、草地、湿地生态系统的 NPP 总量和地均值呈现增加趋势,基于可比降雨条件的年际间调节服务变化总体符合年际间生态系统质量的变化,且侧面反映了可比降雨条件下减少泥沙淤积、减少面源污染、削减洪涝、涵养水源 4 项调节服务的增长主要原因是生态系统质量的生长。

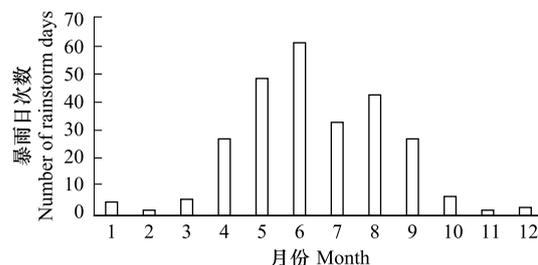


图 4 某站点 31 年间暴雨日次数在全年各月分布情况

Fig. 4 Distribution of the number of storm days throughout the year

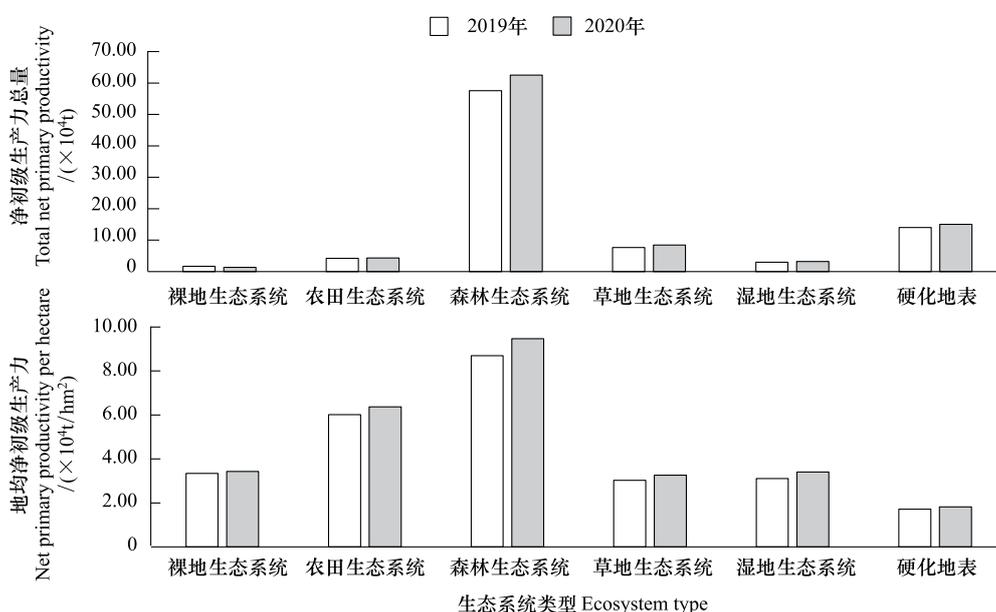


图 5 深圳市 2019、2020 年净初级生产力总量及地均比较

Fig. 5 Comparison of total net primary productivity and mean net primary productivity in Shenzhen between 2019 and 2020

## 5 结论与建议

针对 GEP 核算结果对降雨因素敏感的特征,以及实际降雨条件和多年平均降雨条件在 GEP 核算与管理应用中的短板,本文以深圳为研究案例,提出了可比降雨条件的概念及基于主成分分析法的确定方法。研究表明,主成分分析确定的可比降雨年与深圳当地气象部门发布的气候公报表述内容一致,结果可信度高;同时,基于可比降雨条件进行的 GEP 变化分析,更真实的反映了城市生态系统数量和质量的變化。据此,在年

际间降雨变化较大的情况下,建议政府在开展 GEP 管理应用时,采用可比降雨条件进行 GEP 核算,以降低非人为因素对 GEP 核算结果的影响,使 GEP 变化更能够直接反映生态系统数量和质量的變化。

该方法虽已在深圳有效实践,然而还需在不同地域进一步开展实证研究,以证明本研究结论的普遍适用性;此外本文尚未涉及敏感性研究,针对 GEP 核算结果对降雨因素的敏感性方面,今后可基于长时间序列的逐日降雨监测数据开展。

**致谢:**感谢深圳市气象局(台)提供的关键性降雨特征数据。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 欧阳志云,朱春全,杨广斌,徐卫华,郑华,张琰,肖焱. 生态系统生产总值核算:概念、核算方法与案例研究. 生态学报, 2013, 33(21): 6747-6761.
- [ 2 ] Ouyang Z, Song C S, Zheng H, Polasky S, Xiao Y, Bateman I J, Liu J G, Ruckelshaus M, Shi F Q, Xiao Y, Xu W H, Zou Z Y, Daily G C. Using gross ecosystem product (GEP) to value nature in decision making. PNAS, 2020, 117(25): 14593-14601.
- [ 3 ] 联合国环境经济核算委员会. System of Environmental-Economic Accounting-Ecosystem Accounting. <https://seea.un.org/zh/ecosystem-accounting>
- [ 4 ] 中共中央办公厅 国务院办公厅关于建立健全生态产品价值实现机制的意见. 水利建设与管理, 2021, 41(5): 1-5.
- [ 5 ] 浙江省市场监督管理局,浙江省市场监督管理局批准发布《生态系统生产总值(GEP)核算技术规范 陆域生态系统》省级地方标准, [http://zjamr.zj.gov.cn/art/2020/9/29/art\\_1229047334\\_58814039.html](http://zjamr.zj.gov.cn/art/2020/9/29/art_1229047334_58814039.html).
- [ 6 ] 黄山市市场监督管理局,浙江省市场监督管理局批准发布《生态系统生产总值(GEP)核算技术规范》市级地方标准, <http://scjg.huangshan.gov.cn/zwgk/public/6615740/10466862.html>.
- [ 7 ] 深圳市市场监督管理局,深圳市地方标准批准发布公告(总第 50 号), [http://amr.sz.gov.cn/xxgk/qt/tzgg/content/post\\_8567911.html](http://amr.sz.gov.cn/xxgk/qt/tzgg/content/post_8567911.html).
- [ 8 ] 江西省市场监督管理局,江西省市场监督管理局批准发布《生态系统生产总值核算技术规范》省级地方标准, [http://www.jxfz.gov.cn/art/2021/7/9/art\\_3826\\_3711859.html](http://www.jxfz.gov.cn/art/2021/7/9/art_3826_3711859.html).
- [ 9 ] Liu L B, Wang Z, Wang Y, Zhang Y T, Shen J S, Qin D H, Li S C. Trade-off analyses of multiple mountain ecosystem services along elevation, vegetation cover and precipitation gradients: a case study in the Taihang Mountains. Ecological Indicators, 2019, 103: 94-104.
- [ 10 ] Chen J H, Wang Y F, Sun J, Liang E Y, Shen M G, Yang B, Jia X H, Zhang J X. Precipitation dominants synergies and trade-offs among ecosystem services across the Qinghai-Tibet Plateau. Global Ecology and Conservation, 2021, 32: e01886.
- [ 11 ] de Jesus Crespo R, Wu J, Myer M, Yee S, Fulford R. Flood protection ecosystem services in the coast of Puerto Rico: associations between extreme weather, flood hazard mitigation and gastrointestinal illness. Science of the Total Environment, 2019, 676: 343-355.
- [ 12 ] 欧阳志云,林亦晴,宋昌素. 生态系统生产总值(GEP)核算研究——以浙江省丽水市为例. 环境与可持续发展, 2020, 45(6): 80-85.
- [ 13 ] 董天,张路,肖焱,郑华,黄斌斌,欧阳志云. 鄂尔多斯市生态资产和生态系统生产总值评估. 生态学报, 2019, 39(9): 3062-3074.
- [ 14 ] 杨渺,肖焱,欧阳志云,叶宏,邓懋涛,艾蕾. 四川省生态系统生产总值(GEP)的调节服务价值核算. 西南民族大学学报:自然科学版, 2019, 45(3): 221-232.
- [ 15 ] Frizzle C, Fournier R A, Trudel M, Luther J E. Using the Soil and Water Assessment Tool to develop a LiDAR-based index of the erosion regulation ecosystem service. Journal of Hydrology, 2021, 595: 126009.
- [ 16 ] Shen J, Du S Q, Huang Q X, Yin J, Zhang M, Wen J H, Gao J. Mapping the city-scale supply and demand of ecosystem flood regulation services—A case study in Shanghai. Ecological Indicators, 2019, 106: 105544.
- [ 17 ] Li P, Sheng M Y, Yang D W, Tang L H. Evaluating flood regulation ecosystem services under climate, vegetation and reservoir influences. Ecological Indicators, 2019, 107: 105642.
- [ 18 ] 束承继,蔡文博,韩宝龙,李先源,江南,欧阳志云. 基于快速普查方法的深圳植被优势种特征研究. 生态学报, 2020, 40(23): 8516-8527.
- [ 19 ] 饶显龙. 深圳市仙湖植物园植物景观研究[D]. 杭州:浙江农林大学, 2014.
- [ 20 ] 虞晓芬,傅玳. 多指标综合评价方法综述. 统计与决策, 2004(11): 119-121.
- [ 21 ] Salata S, Grillenzoni C. A spatial evaluation of multifunctional Ecosystem Service networks using Principal Component Analysis: a case of study in Turin, Italy. Ecological Indicators, 2021, 127: 107758.
- [ 22 ] Franklin J B, Sathish T, Vinithkumar N V, Kirubakaran R. A novel approach to predict chlorophyll-a in coastal-marine ecosystems using multiple linear regression and principal component scores. Marine Pollution Bulletin, 2020, 152: 110902.
- [ 23 ] Marsboom C, Vrebos D, Staes J, Meire P. Using dimension reduction PCA to identify ecosystem service bundles. Ecological Indicators, 2018, 87: 209-260.
- [ 24 ] 华元渝,胡传林,张水元,陈少莲. 主成分分析方法在鲢鱼种生长体征指标分析中的应用. 生态学报, 1982, 2(3): 267-278.
- [ 25 ] 高燕俐,刘小刚,冷险险,章宇阳,董建华,范诚. 基于主成分分析的广西省干旱时空格局. 生态学报, 2020, 40(16): 5591-5601.
- [ 26 ] 李霞,朱万泽,舒树森,盛哲良,王文武. 基于主成分分析的大渡河中游干暖河谷草地土壤质量评价. 生态学报, 2021, 41(10): 3891-3900.
- [ 27 ] 傅湘,纪昌明. 区域水资源承载力综合评价——主成分分析法的应用. 长江流域资源与环境, 1999, 8(2): 168-173.
- [ 28 ] 林海明,张文霖. 主成分分析与因子分析的异同和 SPSS 软件——兼与刘玉玫、卢纹岱等同志商榷. 统计研究, 2005, 22(3): 65-69.
- [ 29 ] 刘潇,薛莹,纪毓鹏,徐宾铎,任一平. 基于主成分分析法的黄河口及其邻近水域水质评价. 中国环境科学, 2015, 35(10): 3187-3192.
- [ 30 ] 王莺,王静,姚玉璧,王劲松. 基于主成分分析的中国南方干旱脆弱性评价. 生态环境学报, 2014, 23(12): 1897-1904.
- [ 31 ] 深圳市气象局. 2008—2020 年深圳市气候公报. <http://weather.sz.gov.cn/>.