

DOI: 10.20103/j.stxb.202402200357

黄钰婷, 曹雅蓉, 吴隽宇, 周哲琛. 长三角生态系统服务驱动因素的交互效应及其阈值. 生态学报, 2024, 44(21): 9956-9973.

Huang Y T, Cao Y R, Wu J Y, Zhou Z C. Interaction effects and key threshold: analyzing the drivers of ecosystem service in the Yangtze River Delta region. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(21): 9956-9973.

长三角生态系统服务驱动因素的交互效应及其阈值

黄钰婷¹, 曹雅蓉¹, 吴隽宇^{1,2,3,*}, 周哲琛⁴

¹ 华南理工大学建筑学院, 广州 510640

² 华南理工大学亚热带建筑与城市科学全国重点实验室, 广州 510640

³ 广州市景观建筑重点实验室, 广州 510640

⁴ 华东理工大学艺术与传媒学院, 上海 200237

摘要: 科学管理生态系统以促进多种生态系统服务的可持续供应, 对于区域高质量发展具有重要意义。精准制定生态系统管理措施要求深入了解各种生态系统服务的多重驱动因素之间的交互效应及其关键影响阈值, 然而当前研究对此理解有限。为此, 以 2020 年的长三角地区为例, 使用 InVEST、CASA 和 MaxENT 等模型评估研究区 6 种关键生态系统服务供应(气候调节、碳固定、土壤保持、产水量、粮食生产和休闲游憩)。运用约束线法分析单一驱动因素对各个生态系统服务的约束作用与关键阈值; 然后, 借助条件推理树进一步揭示了多种驱动因素的交互效应及其阈值。研究结果表明: (1) 长三角地区的 6 种关键生态系统服务有显著的空间异质性并且受 12 个生态-社会经济驱动因素的影响, 其中, 气候与土地利用的影响最为显著。(2) 12 个驱动因素对 6 种关键生态系统服务呈现出 4 类非线性性和 2 类线性约束作用, 共识别出 32 个关键阈值。(3) 特定自然驱动因素会在多因素交互作用下形成的阈值范围内显著影响生态系统服务, 例如太阳辐射在特定降雨量(1604.6—1808.5mm)与风速(4.3—4.8m/s)的组合条件下会明显增加产水量。创新整合运用约束线与条件推理树, 揭示了驱动因素的非线性作用及关键阈值, 为长三角地区生态系统管理措施制定提供了方法参考与决策依据。

关键词: 生态系统服务; 驱动因素; 约束线; 条件推理树; 长三角地区

Interaction effects and key threshold: analyzing the drivers of ecosystem service in the Yangtze River Delta region

HUANG Yuting¹, CAO Yarong¹, WU Juanyu^{1,2,3,*}, ZHOU Zhechen⁴

¹ School of Architecture, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China

² State Key Laboratory of Subtropical Building and Urban Science, Guangzhou 510640, China

³ Guangzhou Key Laboratory of Landscape Architecture, Guangzhou 510640, China

⁴ School of Art Design and Media, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China

Abstract: Scientific management of ecosystems to enhance the sustainable supply of multiple ecosystem services (ES) is important for regional high-quality development. The precise formulation of ecosystem management measures requires a deeper understanding of the interaction effects between multiple drivers of ES and their key impact thresholds, yet current research has limited understanding of this problem. This study took the Yangtze River Delta (YRD) region in 2020 as an example and assessed the supply of 6 key ES (Climate Regulation, Carbon Sequestration, Soil Retention, Water Yield, Food Production, Leisure and Recreation) in 2020 by using models such as InVEST, CASA, and MaxENT. The constraint line method was used to analyze the constraining effect of the single driver on each ES and its key thresholds. Furthermore,

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978274); 广东省自然科学基金项目(2023A1515011451)

收稿日期: 2024-02-20; **网络出版日期:** 2024-08-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wujuanyu@scut.edu.cn

the study revealed the interactive effects of multiple drivers and their impact thresholds by using conditional inference trees. The study results showed that: (1) The 6 ES in the YRD were characterized by remarkable spatial heterogeneity and are affected by 12 ecological-socioeconomic drivers, among which climate and land use were the most significant. (2) The 12 drivers showed 4 non-linear and 2 linear patterns for the 6 ES, with 32 key impact thresholds. (3) Specific ecological drivers significantly affected ES within the thresholds formed by multi-factor interactions, for example, solar radiation significantly increased water production in the condition consisting of the specific combination of rainfall (1604.6—1808.5mm) and wind speed (4.3—4.8m/s). The study innovatively integrates the constraint lines and conditional inference trees to reveal the nonlinear effects of the driving factors and their key impact thresholds, which provides methodological reference and decision-making basis for the formulation of ecosystem management measures in the YRD.

Key Words: ecosystem service; driving factor; constraint line; conditional inference trees; Yangtze River Delta region

生态系统为人类提供的生态系统产品和服务,即生态系统服务(Ecosystem Service, ES),是人类生存与发展的必要基础^[1]。然而,快速城市化过程中的土地利用方式转变以及自然资源开发等行为,极大地改变了生态系统结构与过程^[2],直接或间接地导致生态系统服务衰退,进而对人类福祉造成严重威胁^[3]。当前,国土空间生态管理要求在统筹全域全要素的基础上,深入剖析社会-生态系统运转的内在机制和多元过程,以实现区域生态系统的整体保护。因此,全面理解多种因素驱动生态系统服务的复杂机制,并高效地协同提升多重生态系统服务,已成为当前区域生态系统管理亟待研究的重要课题。

众多研究表明,生态系统服务受气候、地形和土壤等自然因素^[4-5]与人口规模、开发建设和经济活动等社会经济因素^[6-7]的共同影响。自然因素作为生态系统的固有属性,直接参与了碳循环、水文循环与植被生长等生态过程,从而深刻影响生态系统服务供应的空间格局与数量;社会经济因素则通过改变生态系统的空间分布与内在过程,对生态系统服务供应产生强烈扰动。目前,分析生态系统服务驱动因素的常用方法包括传统回归法、融合空间信息的地理加权回归法以及机器学习回归算法(如随机森林)等^[8-11]。然而,现实中的驱动因素多以非线性方式影响生态系统服务供应,不同类型的生态系统服务与各种驱动因素之间也存在多种相关性模式^[4-5]。因此,基于线性相关假设的传统回归和地理加权回归法所得结果通常难以准确反映实际情况,存在一定偏差^[12]。相比之下,线束线法通过分位数分割法选取数据边界散点并进行最优曲线拟合,能够更全面剖析生态系统服务与驱动因素间复杂的非线性关系^[13]。同时,约束线法还可根据拟合方程,精准识别非线性关系中驱动因素的关键阈值,即导致作用强度或方向发生显著变化的转折点^[14-15],有效弥补了大多数机器学习算法在解释因素具体影响方式上的不足。

此外,在具有复杂因果关系的生态-社会经济系统中,多种驱动因素之间往往具有联合效应^[16-17]。在多种驱动因素的共同影响下,特定驱动因素的作用强度和方向也可能会发生变化^[16]。例如,Liu等^[17]发现气候因素通过影响城市化对生态系统服务产生了间接的负面作用;Guo等^[18]发现特定蒸散和降水条件下的温度上升会促进植被生长,从而增加半干旱地区的生态系统服务供应。然而,现有研究多聚焦于单个驱动因素对生态系统服务的独立影响或两个驱动因素间的相互作用^[19],忽视了多个驱动因素之间的复杂交互,难以为高效精准的生态管理提供有效参考。尽管已有学者尝试使用偏最小二乘路径模型^[20]和偏最小二乘结构方程模型^[17]等方法,分析多个驱动因素对生态系统服务的协同影响。但这些全局回归分析方法仅能呈现驱动因素在研究区内的平均影响,难以深入挖掘不同生态-社会经济条件下驱动因素导致生态系统服务发生显著变化的关键阈值。当前,也有学者进一步运用决策树分析多驱动因素间的交互效应^[11, 21-23]及其关键阈值,但决策树算法在递归二元分割过程中易产生选择偏差和过拟合问题^[24],其结果可靠性仍待进一步检验。近年兴起的条件推理树(Conditional Inference Tree, CIT)^[25]通过将无偏递归二元分割过程内嵌至基于置换测试的“条件”框架中,根据变量的显著性检验进行递归分割,直至找到与响应变量相关性最强的协变量,较好地改进了决策树算法的缺陷。

长三角地区作为我国经济最发达、人口最密集的高度城市化区域^[26–27],面临着生态系统服务退化的严峻挑战^[28–30]。为应对这一生态问题,2019 年国家发展改革委发布的《长三角生态绿色一体化发展示范区总体方案》明确指出,长三角将致力于打造中国生态友好型发展示范区,并将生态保护置于优先地位,积极探索区域一体化的生态管理模式。因此,厘清长三角地区生态系统服务的驱动因素及其作用机制对当地实现可持续发展至关重要,也可为其他城市化区域的生态系统管理提供科学参考。本研究以长三角地区为例,旨在创新性地整合约束线法与条件推理树,以非线性视角深入分析多种生态系统服务驱动因素的影响及其关键阈值。具体研究内容包括:(1)综合多种模型量化评估 2020 年 6 种关键生态系统服务的供应量;(2)基于分位数分割的约束线法,分析多种驱动因素对 6 种生态系统服务的独立影响及其阈值;(3)运用条件推理树,进一步分析多种驱动因素对 6 种生态系统服务的交互影响及其阈值。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

长三角地区(114.56E—124.25E,26.57N—35.67N),包括江苏省内 13 个市、浙江省内 11 个市、安徽省内 16 个市和一个直辖市(上海)(图 1),总面积达 35.8 万 km²。该区域内的地势西南高东北低,地貌类型以平原和丘陵为主,水网密布且生态系统类型多样,并属于季风期气候带湿润区,年均降水量 1000—1400mm,年均温 14—18℃。

2005 至 2020 年间,长三角地区的城市人口增长率达 70.53%,城市建设用地面积从 6215.03km² 上升至 12002.8km²,GDP 从 46189.7 亿元提升至 244713.53 亿元。然而,快速的人口、土地和经济城市化不可避免地消耗了长三角地区的大量自然资源,严重破坏了区域生态系统,生物多样性丧失、热岛效应加剧、粮食和水资源短缺、水土流失和人居环境质量下降等问题频发^[28–30]。

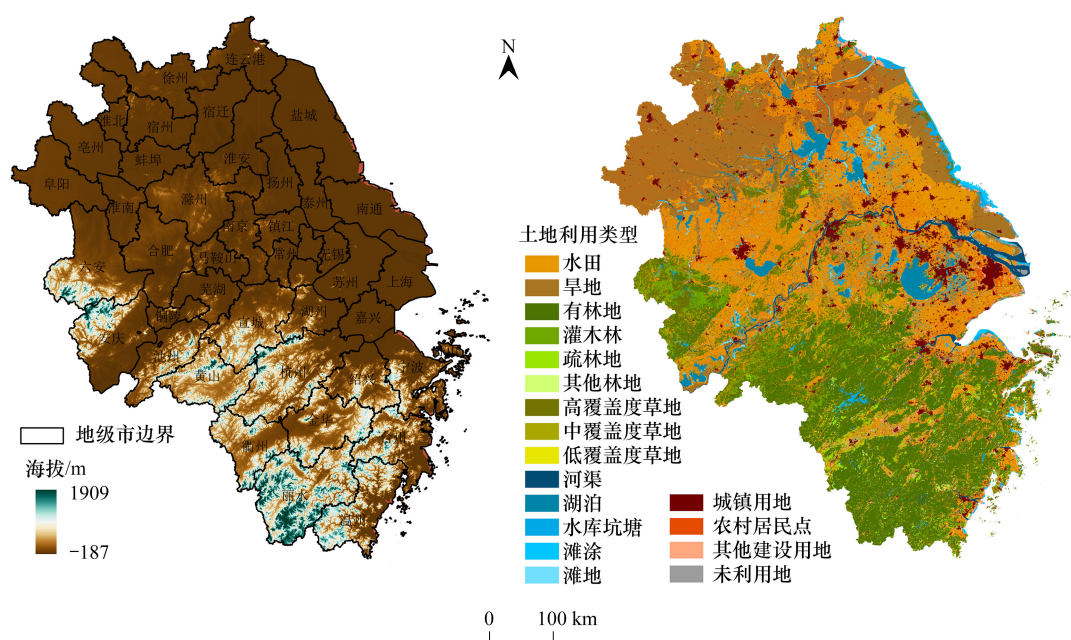


图 1 研究区的地理位置、高程及 2020 年的土地利用

Fig.1 Geographic location, elevation and land use of the study area in 2020

1.2 数据来源

本文所使用数据的信息详见表 1,在后续研究中使用 ArcGIS 10.2 对所有数据的空间坐标系与分辨率进行了统一处理。

表 1 研究数据来源
Table 1 Data source

序号 Number	数据名称 Data name	格式 Format	分辨率 Resolution	数据来源 Source
1	土地利用数据	栅格	30m	中国科学院地理科学与资源研究所, http://www.resdc.cn
2	植被类型数据	栅格	1km	
3	各等级的自然保护区、森林公园、风景名胜 区等现有生态保护区与旅游景点数据	矢量	—	高德地图, https://ditu.amap.com/
4	食宿、餐饮 poi 数据	矢量	—	
5	道路数据	矢量	—	OpenStreetMap, https://www.openstreetmap.org/#map=4/36.96/104.17
6	水系数据	矢量	—	
7	人口密度数据	栅格	1km	WorldPop, https://www.nature.com/articles/sdata20174/
8	“类 NPP-VIRS”夜间灯光数据集 ^[31]	栅格	500m	国家地球系统科学数据中心, http://www.geodata.cn/
9	中国区域 1km 分辨率逐月近地表平均气温 数据集 ^[32]	栅格	1km	
10	1901–2020 年中国 1km 分辨率逐月平均气 温数据集 ^[33]	栅格	1km	
11	1901–2020 年中国 1km 分辨率逐月降水量 数据集 ^[33]	栅格	1km	
12	2005–2020 年中国 1km 分辨率月平均风速 数据集 ^[32]	栅格	1km	
13	日照时数	表格	—	国家气象科学数据中心, http://data.cma.cn
14	NDVI 逐月数据	栅格	1km	美国国家航空航天局 MODIS13A2 NDVI 数据, https://modis.gsfc.nasa.gov/
15	高程数据	栅格	30m	地理空间数据云, http://www.gscloud.cn/sources/
16	叶面积指数数据	栅格	500m	中国科学院地理科学与资源研究所, http://www.resdc.cn
17	包括植物根系深度、砂粒含量、粉粒含量等 的世界土壤数据库	栅格	500m	联合国粮食及农业组织门户网站, https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en
18	各市县稻米产量数据	表格	—	各市县的统计年鉴
19	GDP 数据	栅格	1km	地理空间数据云, http://www.gscloud.cn/sources/

2 研究方法

2.1 生态系统服务供应评估

本研究基于《资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价指南(试行)》(2020 年版)等国家生态保护政策与长三角地区的典型生态问题,选取了 6 种生态系统服务进行评估,涵盖了支持、调节、供给与文化 4 大类型,具体评估方法如表 2 所示。

考虑到 1km 栅格尺度是当前我国生态管理的最小单元尺度^[59],本研究的生态系统服务的评估与制图均在 1km 栅格尺度进行。此外,本研究借助统计年鉴数据、实测数据集和相关研究结果等资料,校验了评估结果。

2.2 自然-社会经济驱动因素筛选

本研究从气候、地形、土壤组分特征与植被覆盖、土地利用和社会经济活动 5 个方面,选取了 24 个典型的潜在驱动因素(表 3)。其后,为提升分析效率与合理性,本研究采用斯皮尔曼相关性分析法,对 24 个潜在影响因素与 6 种生态系统服务供应间的非线性相关性进行测度,筛选出具有显著影响的驱动因素(相关性系数的绝对值大于 0.5)。

表 2 生态系统服务供应的评估方法

Table2 Assessment methods of the supply of ecosystem services

生态系统服务类型 Types of ES	指标定义 Indicator definitions	评估方法 Assessment methods
气候调节 Climate regulation	在高温月份,生态用地区内的植被和水体分别通过遮阴、蒸腾与蒸发作用以降低周边区域的气温的调节作用 ^[34] 。	本研究通过有一定植被或水域覆盖的生态用地区(耕地、林地、草地、水域、未利用地)与建设用地区的近地面平均温度之差来评估生态用地区的气候调节服务供应^[35-36]。根据长三角地区的亚热带季风气候特征与气候调节的指标定义,本研究评估时期选取夏季(4—10月)。为降低长三角地区内气象特征差异对测度结果精度的影响,我们以地级市为基本单元估算区域内生态用地区的气候调节供应。$S_{HTR_{-xj}} = T_{e_{-xj}} - T_{u_{-j}}$ 式中,$S_{HTR_{-xj}}$为第j个地级市的生态用地区内栅格x的气候调节服务供应量($^{\circ}\text{C}$);$T_{e_{-xj}}$为4—10月第j个地级市的生态用地区内栅格x的近地面平均温度($^{\circ}\text{C}$);$T_{u_{-j}}$为4—10月第j个地级市内建设用地区的整体近地面平均温度($^{\circ}\text{C}$)。 本研究采用基于光能利用率的过程模型 CASA 估算,其后根据碳与二氧化碳的质量比测算区域碳固定量^[39-43]。
碳固定 Carbon sequestration	绿色植被通过光合作用将大气中吸收的二氧化碳与水分结合 ^[37-38] ,进而将碳封存在植物内部。	$S_{CS_{-x}} = NPP_{-x} \times 3/11$ $NPP_{-x} = APAR(x,t) \times \varepsilon(x,t)$ 式中,$S_{CS_{-x}}$为栅格x的碳固定服务供应量($\text{g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$);$NPP_{-x}$为栅格$x$的 NPP ($\text{gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$);$APAR(x,t)$为栅格$x$在$t$月份所吸收的光合有效辐射($\text{gC m}^{-2} \text{ m}^{-1}$);$\varepsilon(x,t)$为栅格$x$在$t$月份的实际光能利用率($\text{gC/MJ}$)。 本研究采用 InVEST 模型的 Sediment Delivery Ratio 模块,基于通用的水土流失方程量化土壤保持。
土壤保持 Soil retention	生态系统通过植被覆盖等水土保持措施维护的土壤资源量 ^[44] 。	$S_{SR_{-x}} = R_{-x} \times K_{-x} \times LS_{-x} \times (1 - C_{-x} P_{-x})$ 式中,$S_{SR_{-x}}$为栅格x的土壤保持服务供应量(t/km^2);R_{-x}为栅格x的降水侵蚀力因子($\text{MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$);$K_{-x}$为栅格$x$修正后的土壤可蚀性因子($\text{t mm hm}^{-2} \text{ h hm}^{-2} \text{ MJ mm}^{-1}$);$LS_{-x}$为栅格$x$的地形因子($L$和$S$分别为坡长因子和坡度因子);$C_{-x}$、$P_{-x}$分别为栅格$x$的植被覆盖和管理因子与水土保持措施因子^[45-50]; K_{-x}为栅格x基于 EPIC 模型的土壤可蚀性因子修正值。 本研究采用 InVEST 模型的 Water Yield 模块衡量产水量。
产水量 Water yield	水生态系统向自然与人类社会提供淡水资源的能力 ^[51] 。	$S_{WY_{-x}} = (1 - AET_{-x}/P_{-x}) \times P_{-x}$ $AET_{-x}/P_{-x} = 1 + PET_{-x}/P_{-x} - [1 + (PET_{-x}/P_{-x})^{\omega_x}]^{\frac{1}{\omega_x}}$ 式中,$S_{WY_{-x}}$为栅格x的产水量服务供应量(mm);AET_{-x}为栅格x的年实际蒸散量(mm);P_{-x}为栅格x的年平均降水量(mm);PET_{-x}为栅格x的年潜在蒸散量(mm)^[46,52-53]。
粮食生产 Food production	生态系统向人类提供的稻米类主食 ^[54] 。	$S_{FP_{-xj}} = H_j \times NPP_{-xj} \times \alpha$ $H_j = Y_j / (NPP_{-i} \times \alpha)$ 式中,$S_{FP_{-xj}}$为第j个地级市内耕地栅格x的粮食生产服务供应量(t/km^2);NPP_{-xj}为第j个地级市内耕地栅格x的 NPP,采用碳固定模块的 NPP 结果;α为将碳含量转为干物质量的系数,取值为 2.22^[55]; H_j为第j个地级市内的稻米产量转换系数;Y_j为第j个地级市内的稻米总产量;NPP_{-j}为第j个地级市内的 NPP 总和。
休闲游憩 Leisure and recreation	陆地和水域自然景观提供休闲游憩服务的能力或潜力 ^[56-57] 。	本研究采用最大熵模型(Maximum Entropy, MaxEnt)分别预测 8 类旅游景点 poi 样本数据的空间分布指数表征休闲游憩服务供应量^[58]。 $S_{LRS_{-x}} = (S_{\text{park}_{-x}} + S_{\text{square}_{-x}} + S_{\text{scenic}_{-x}} + S_{\text{botan}_{-x}} + S_{\text{zoo}_{-x}} + S_{\text{memo}_{-x}} + S_{\text{heritage}_{-x}} + S_{\text{aquarium}_{-x}})/8$ 式中,$S_{LRS_{-x}}$为栅格x的休闲游憩服务供应量;$S_{\text{park}_{-x}}$、$S_{\text{square}_{-x}}$、$S_{\text{scenic}_{-x}}$、$S_{\text{botan}_{-x}}$、$S_{\text{zoo}_{-x}}$、$S_{\text{memo}_{-x}}$、$S_{\text{heritage}_{-x}}$、$S_{\text{aquarium}_{-x}}$分别为栅格x的公园、广场、风景名胜、植物园、动物园、纪念园、世界遗产点与水族馆分布指数。

表 3 生态系统服务供应的潜在驱动因子

Table 3 Potential driving factors of the supply of ecosystem services

类型 Types	潜在驱动因素 Potential driving factors	选取理由 Reasons for selection
气候 Climate	年平均气温、年最高气温、年平均降水量、年总太阳辐射量、年平均风速	这些气候因素极大地影响了区域植被生长发育、大气环流与水循环,从而影响生态系统服务供应。
地形 Topography	高程、坡度	高程和坡度是导致区域降水量、温度、蓄水量等控制因子发生垂直或横向变化的重要因素,对生态系统服务有重要影响。
土壤组分特征与植被覆盖 Characterization of soil components and vegetation cover	土壤水分含量、2.3m 土壤 PH 值、土壤孔隙度、0—30cm 土壤砂粒含量、0—30cm 土壤粘粒含量、年最大归一化植被指数	土壤组分特征因子是调节土壤固、液、气三相的量和结构,进而影响区域土壤的植被培育、水土保持与养分调蓄能力的关键要素。年最大归一化植被指数可准确反映地表植被覆盖状况。
土地利用 Land use	1km ² 栅格内的草地面积占比、耕地面积占比、建设用地面积占比、林地面积占比	土地利用是人类干预自然最显著的行为表征,与各种维持生态系统运转的生物物理过程密切相关。耕地、生态用地(草地、林地)、建设用地对区域生态系统服务供应的影响较大。
社会经济活动 Socio-economic activities	国内生产总值、人口密度、夜间灯光指数、道路密度、与道路距离、河网密度、与水域距离	国内生产总值与人口密度能够衡量区域人口聚集程度和经济发展水平,直接影响了区域生态系统服务的需求程度,是表征人类对生态系统的利用强度的重要指标;夜间灯光指数、道路密度、与道路距离、河网密度以及与水域距离可以综合描述区域人类活动的广度和强度,反映人类参与、管理和改造自然系统的强度与潜力。

2.3 基于约束线法的单一驱动因素影响分析

约束线法在研究多因素驱动的复杂生态系统时,能够有效地排除其他因素的干扰以分析某一驱动因素对生态系统服务供应的约束效应及其阈值^[14-15]。本研究使用基于分位数分割^[60]的约束线法(图 2):首先,将各个驱动因素作为限制变量(x 值),并将各个生态系统服务供应作为响应变量(y 值)绘制二维散点图;随后,借助 R 语言将限制变量的值域均分为 100 组,并从每组中选取 y 值的 99.9% 分位数点作为边界点;最后,利用 Origin 2022 软件对所有边界点进行多项式函数的最优拟合,以提取约束线并确定其函数方程^[61]。

2.4 基于条件推理树的多驱动因素交互效应分析

本研究使用利用 R 语言的 party 包对显著驱动因素多于 1 个的生态系统服务进行基于条件推理树的多驱动因素交互效应分析。本研究,将驱动因素作为 CIT 算法的解释变量,生态系统服务供应则为响应变量。CIT 算法是递归二元分裂决策树算法,对所有可能的分类进行详尽的搜索并通过显著性检验的停止分类标准和无偏递归分割选择合适显示最佳分割的协变量^[25],从而实现探索不同解释变量各状态组合对响应变量的交互作用的目的。算法原理可简要解释为:假设给定的 n 维解释变量向量 X 为 $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$, 响应变量 Y 的条件分布 $D(Y | X)$, 两者关系如下:

$$D(Y | X) = D(Y | X_1, X_2, \dots, X_n) = D(Y | f(X_1, X_2, \dots, X_n)) \quad (1)$$

此外,本研究使用 R 语言的 Carcet 包对训练集进行训练,采用测试集数据诊断条件推理树模型的预测精度。数据库将被随机分为两个部分,其中 80% 的样本被抽取作为构建模型的训练集,20% 的样本作为验证模型的测试集。若模型的分类假设显著性检验水平 P 值大于 0.05 则被拒绝进入最终分类中,即模型将重复计算直至所有分割都不显著或已达到最小节点分类为止。

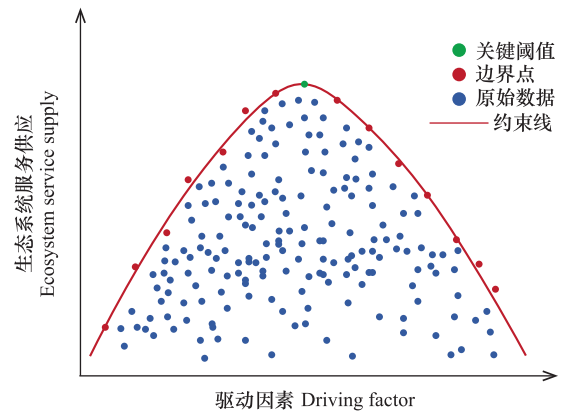


图 2 约束线提取示意图

Fig.2 Illustration of constraint line

3 研究结果

3.1 生态系统服务供应的空间分布

如图 3 所示,长三角地区的 6 种生态系统服务供应具有显著的空间异质性。气候调节的平均供应量为 $0.59^{\circ}\text{C}/\text{km}^2$,其空间分布受到植被的蒸腾作用与水域蒸发的影响,形成以皖西-浙西-浙南丘陵区 ($>2^{\circ}\text{C}/\text{km}^2$) 和长江-太湖-钱塘江等水域 ($0.7\text{—}1.5^{\circ}\text{C}/\text{km}^2$) 为核心向四周辐射减少的特征。碳固定自西南向东北逐步减

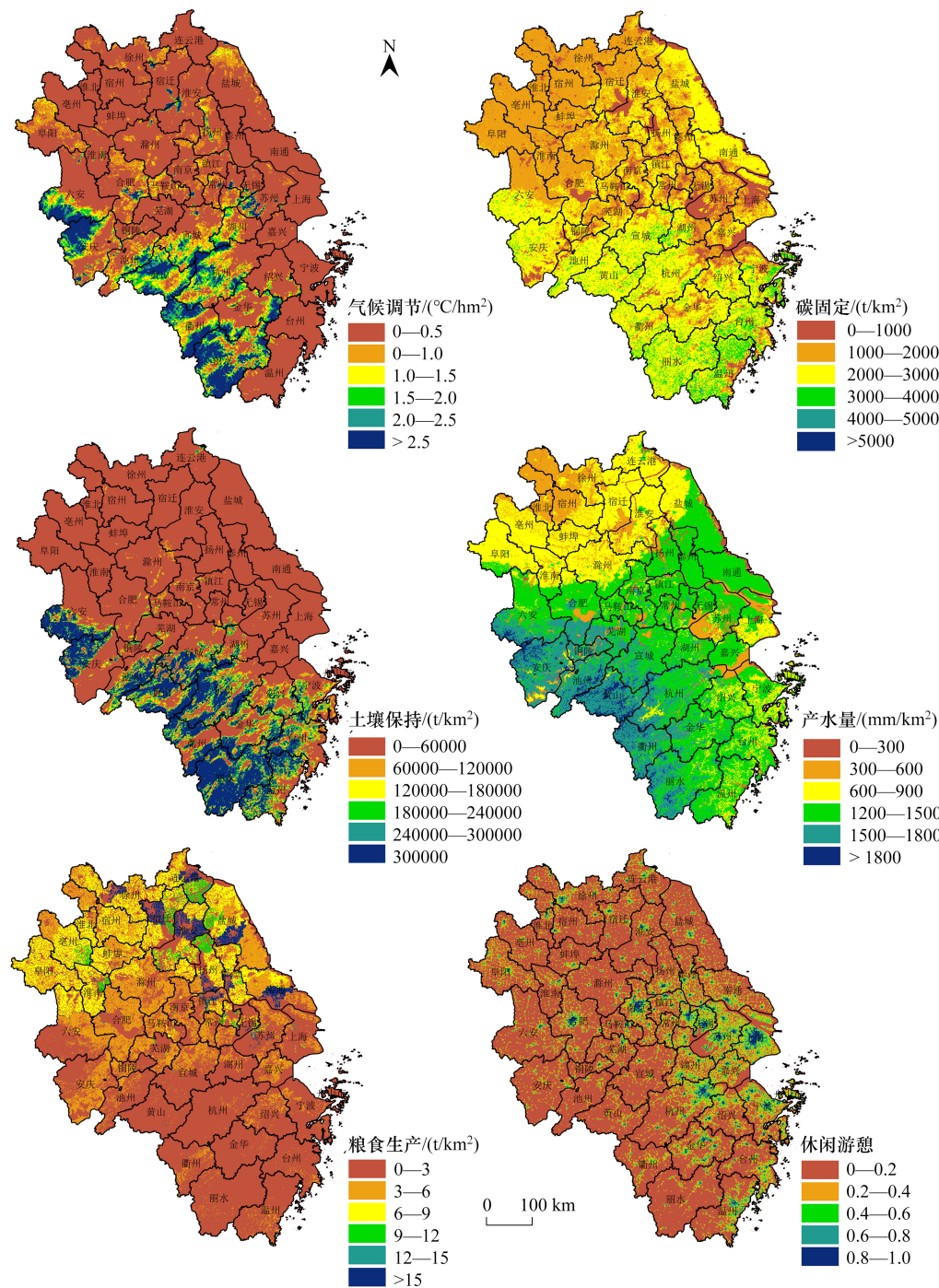


图 3 2020 年长三角地区的 6 种生态系统服务空间分布

Fig.3 Spatial distribution of 6 ecosystem services in the YRD in 2020

少,平均供应量为 $1933.06\text{t}/\text{km}^2$,其高值供应区($>2000\text{t}/\text{km}^2$)集中分布于皖南-浙西-浙南、长江、钱塘江、太湖等水域及其沿岸,以及南部沿海湿地。这些区域的年降雨量充沛,植被覆盖率与郁闭度较高且林地等生态用地较为完整,具有良好的生态基底。

土壤保持的平均供应量为 $109997.27\text{t}/\text{km}^2$,呈现“西南高、东北低”的空间分布特征,其高值区($80000—500000\text{t}/\text{km}^2$)集中于西南部的森林生态屏障区。此区域因地形起伏和降雨量大而存在较高潜在土壤侵蚀量,但得益于茂盛的植被覆盖和高粘粒占比的土壤特征,大量土壤侵蚀获得有效遏制。产水量的平均供应量为 $913206\text{m}^3/\text{km}^2$,其空间分布格局受降水量分布的影响而呈现“南高北低、西高东低”的特征。

粮食生产的平均供应量为 $3.293\text{t}/\text{km}^2$,高值供应区($>6\text{t}/\text{km}^2$)集中分布于皖北、皖江、苏北与苏中等地势平缓区。这些区域密集分布稻田、菜畦与鱼塘等农业用地,是中国主要的商品粮基地。休闲游憩的平均供应量为 0.18 ,呈“多中心聚集、圈层向外递减”的网络状空间格局。该格局以各级道路为骨架串联其点状高供应区域(>0.4),包括城市公园体系较完善的上海、杭州、南京等中心城市,以及旅游文化产业较为发达的金华、淮安、连云港等地区。

3.2 单驱动因素的约束作用及其关键阈值

使用斯皮尔曼相关性分析从 24 个潜在影响因子筛选出得出 12 个显著影响因素(图 4):与道路距离(DFR)、人口密度(PD)、年最大归一化植被指数(NDVI)、高程(DEM)、坡度(GRA)、年平均风速(WF)、年平均降水量(PRE)、年总太阳辐射(SLR)、耕地面积占比(ALP)、建设用地面积占比(CLP)、林地面积占比(WLP)与土壤 PH 值(SPH)。总的来说,气候与土地利用因素的影响最为显著。此外,为保证后续回归模型的合理性,我们对上述 12 个显著影响因素进行了多重共线性检验。结果显示,所有显著影响因素的方差膨胀因子均小于 5,不存在多重共线性问题。

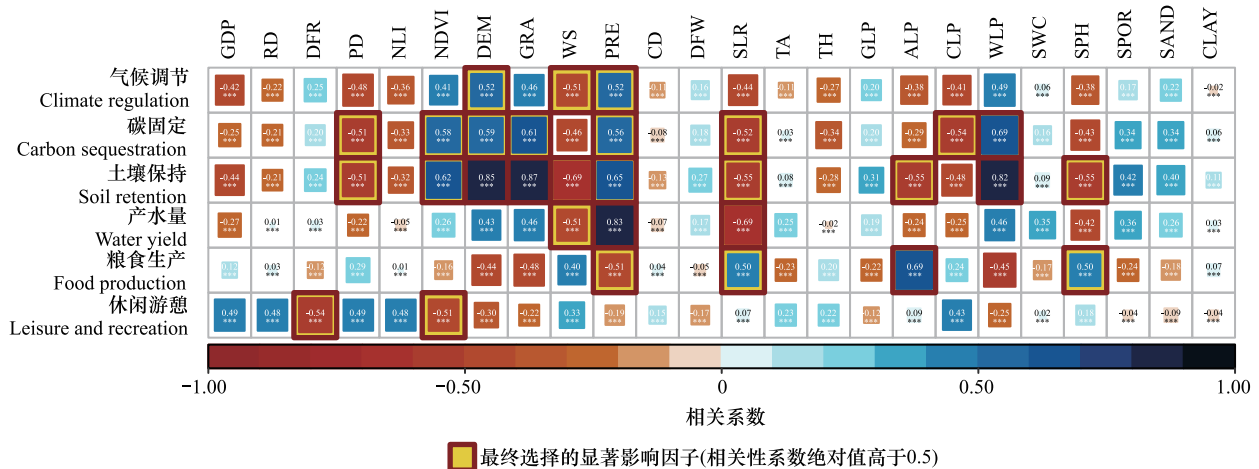


图 4 2020 年长三角地区的 6 种生态系统服务与 24 个潜在影响因子间的相关性

Fig.4 Correlations between 6 ecosystem services and 24 potential driving factors in the YRD in 2020

GDP:国内生产总值;RD:道路密度;DFR:与道路距离;PD:人口密度;NLI:夜间灯光指数;NDVI:年最大归一化植被指数;DEM:高程;GRA:坡度;WS:年平均风速;PRE:年平均降水量;CD:河网密度;DFW:与水域距离;SLR:年总太阳辐射量;TA:年平均气温;TH:年最高气温;GLP:草地面积占比;ALP:耕地面积占比;CLP:建设用地面积占比;WLP:林地面积占比;SWC:土壤水分含量;SPH:土壤 PH 值;SPOR:土壤孔隙度;SAND:土壤砂粒含量;CLAY:土壤粘粒含量

约束线分析结果如图 5、图 6 和图 7 所示,6 种生态系统服务供应均会在 12 个显著影响因素的不同阈值范围内受到差异化的约束。

DEM、PRE 与气候调节间的约束线均呈抛物线型($R^2=0.74$ 、 $R^2=0.35$),即随着 DEM 与 PRE 的增加,其对气候调节的约束作用先减弱后增强。在 DEM-1200m 与 PRE-1600mm 的阈值点左侧,当 DEM 提高,环境的光照强度、昼夜温差与 PRE 也随之增加,这增强了植被的蒸腾作用,使气候调节持续增加至峰值。然而,过多的

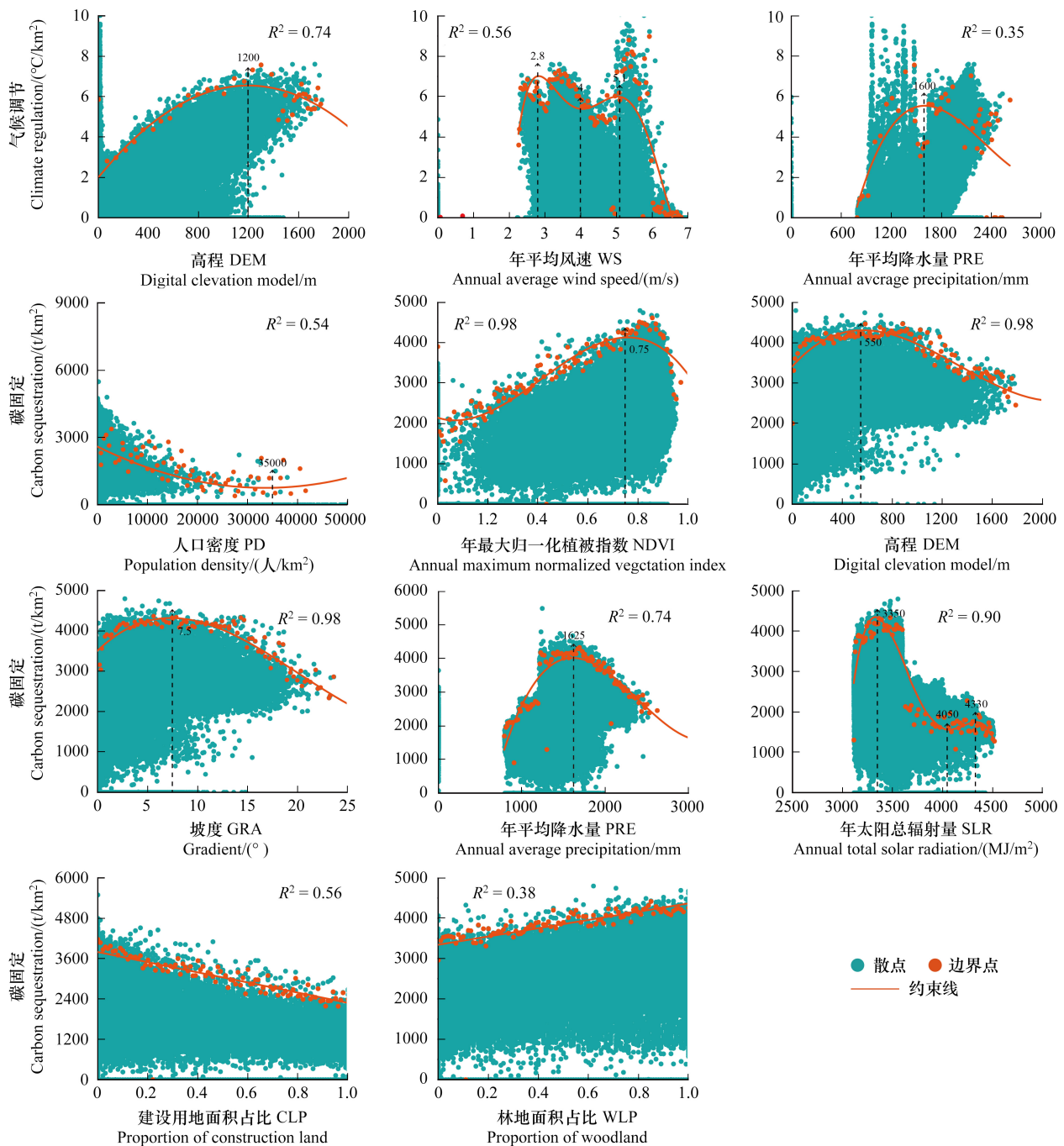


图5 2020年长三角地区气候调节和碳固定与显著影响因素的约束线

Fig.5 Constraint lines for climate regulation and carbon sequestration with driving factors in the YRD in 2020

PRE 可能导致土壤侵蚀的发生,从而负面影响植被的气候调节能力。WS 与气候调节间的约束线则呈凸波型 ($R^2=0.56$),即随着 WS 增加,其对气候调节的约束作用呈现波动特征。当 WS-2.8m/s 和 WS-5.1m/s 时,气候调节分别达到峰值。超过此阈值,过高的 WS 会对植被生长产生不利影响,进而导致气候调节急剧减少。

PD 与碳固定间的约束线大致呈反指数型 ($R^2=0.54$),其关键阈值为 32500 人/ km^2 。在此阈值以内,PD 对碳固定的约束作用将随着 PD 的增加而成比例增强。超过阈值点后,碳固定对 PD 的敏感性降低,PD 的约束作用趋于稳定。NDVI、DEM、GRA、PRE 与碳固定间的约束线均呈抛物线型 ($R^2>0.7$),即 NDVI、DEM、GRA 与 PRE 对碳固定的约束作用先减弱后增强。在 DEM-550m、GRA-7.5°、PRE-1625mm 阈值点左侧,随着 DEM、

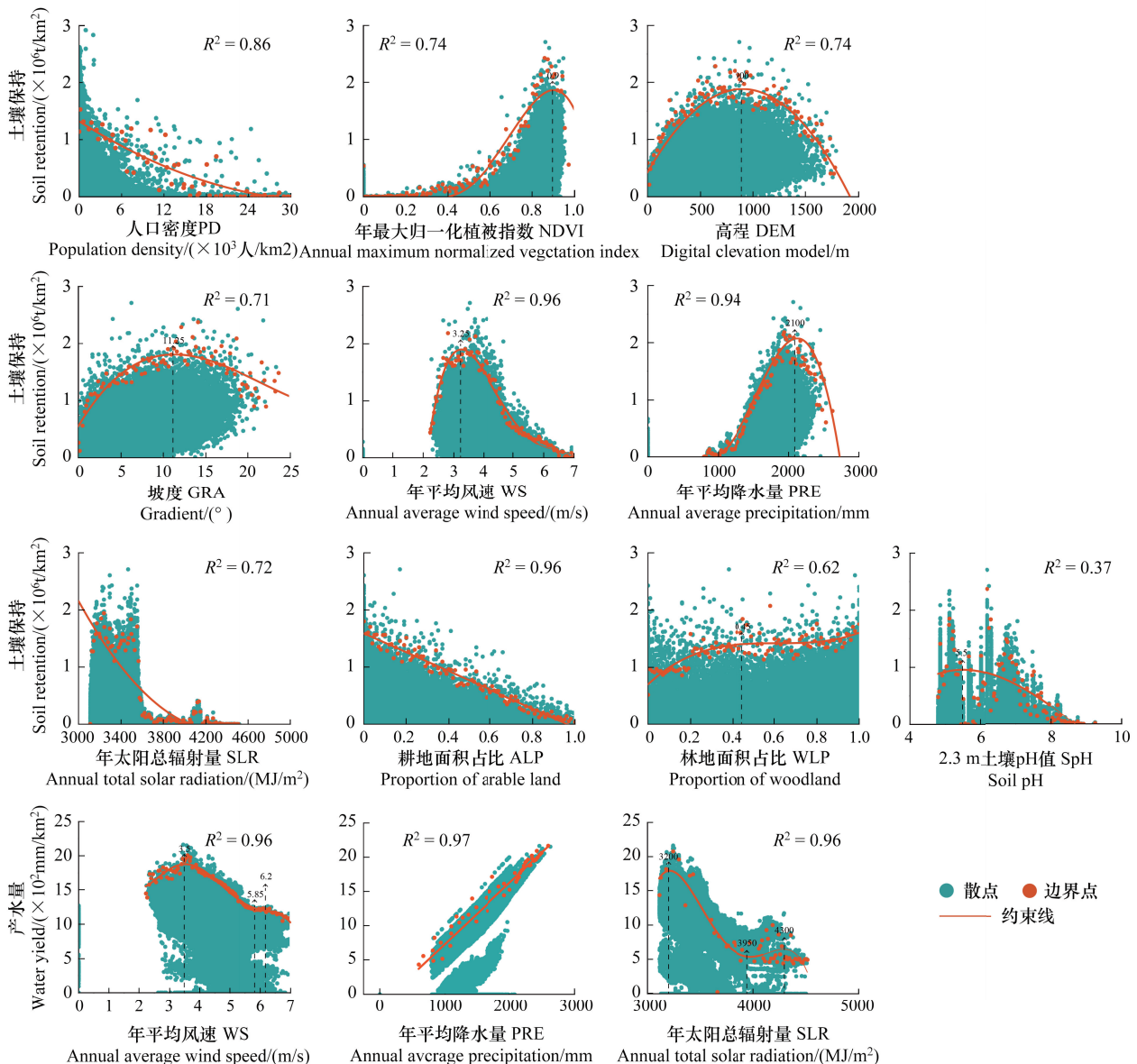


图 6 2020 年长三角地区土壤保持和产水量与显著影响因素间的约束线

Fig.6 Constraint lines for soil retention and water yield with driving factors in the YRD in 2020

GRA 与 PRE 增大,碳固定逐渐达到峰值。当 NDVI 高于 0.75 的阈值点后,碳固定呈现回落的趋势。CLP、WLP 与碳固定间的约束线则分别呈正线型与反线型 ($R^2=0.56$ 、 $R^2=0.38$)。

PD、SLR 与土壤保持的约束线呈反指数型,即随着 PD 与 SLR 的增加,它们对土壤保持的约束作用持续增强 ($R^2>0.7$)。NDVI、DEM、GRA、WS、PRE、SPH 与土壤保持间的约束线呈抛物线型,即随着 NDVI、DEM、GRA、PRE 与 SPH 的增加,它们对土壤保持的约束作用先减弱后增强。其中,土壤保持在 NDVI-0.9、DEM-900mm、GRA-11.25°、WS-3.25m/s、PRE-2100mm、SPH-5.5 的阈值点达到峰值。WLP 与土壤保持间的约束线呈正凸型 ($R^2=0.62$),即超过 WLP-0.45 的阈值点后,其对土壤保持产生的积极效应有限。ALP 与土壤保持之间的约束线呈反线型 ($R^2=0.96$),表明 ALP 的增加以及农业生产相关的污染会对土壤肥力造成不可逆的损害,进而持续削减土壤保持。

WS、SLR 与产水量的约束线呈凸波型 ($R^2=0.96$ 、 $R^2=0.78$),表明 WS 与 SLR 对产水量的约束作用随着增长而不断波动变化,其阈值点分别为 WS-3.5m/s、SLR-3200MJ/m²和 WS-6.2m/s、SLR-4300MJ/m²。PRE 与产

水量间的约束线则呈正线型 ($R^2 = 0.97$), 即随着 PRE 的增大, 其对产水量的约束作用成比例减弱。

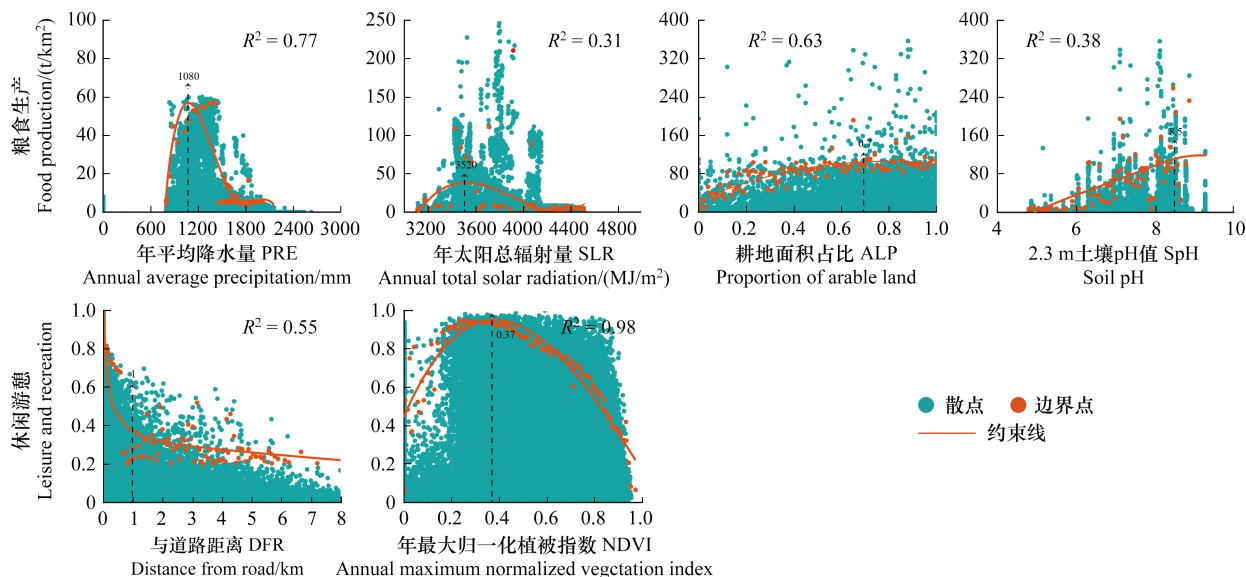


图7 2020 年长三角地区的粮食生产和休闲游憩与显著影响因素间的约束线

Fig.7 Constraint lines for food production and leisure and recreation with driving factors in the YRD in 2020

粮食生产与碳固定都高度依赖于植被净初级生产能力, 均受降水、光照和土壤性质等因素的相似驱动影响。具体而言, PRE、SLR 与粮食生产间的约束线均大致呈抛物线型 ($R^2 = 0.77$ 、 $R^2 = 0.31$), 即 PRE 与 SLR 对粮食生产的约束作用分别呈波动变化和先减弱后增强的特征。且粮食生产在 PRE-1080mm、SLR-3520MJ/m² 的阈值点达到峰值。ALP、SPH 与粮食生产间的约束线则呈正凸型 ($R^2 = 0.63$ 、 $R^2 = 0.38$), 其阈值点分别为 ALP-0.7 和 SPH-9。

DFR、NDVI 与休闲游憩间的约束线分别呈反指数型 ($R^2 = 0.55$) 与抛物线型 ($R^2 = 0.98$)。随着 DFR 的增加, 交通便利程度降低, 导致休闲游憩在 DFR-1km 的阈值点达到谷值。但超过谷值后, 休闲游憩对 DFR 的变化不敏感。NDVI 值越高则植被越茂盛, 自然景观资源往往越丰富, 因此休闲游憩随 NDVI 上升而持续增加并在 NDVI-0.37 达峰值。

3.3 多驱动因素的交互关系及其关键阈值

气候调节与 DEM、WS、PRE 的条件推理树由 21 个节点组成 (图 8), DEM 是最重要的影响因子。以 DEM-122m 为分割点, 关键交互影响组合为 DEM+WS 和 DEM+PRE。比较节点 5、6、14、16、19、20、21 可知, WS 对于气候调节抑制作用仅在 DEM 较小 ($DEM \leq 8m$) 时会有明显表现; 比较节点 13、16 可知, DEM 的增加能显著提升 PRE 对 HTR 的促进作用; 比较 9、11、12、13、14 可知, 当 DEM 在一定范围内 ($8m < DEM \leq 35m$) 时, PRE 对气候调节的促进作用在超过 993.9mm 的阈值后不会有显著增加; 另外, 比较节点 16、19、20、21 可知, 当 DEM 在 8m 至 122m 范围内, 气候调节将随 PRE 的增多而增强, 而 DEM 变化是否对气候调节产生影响需要视具体情况而定 ($8m < DEM \leq 35m$ 时影响不大, $35m < DEM \leq 122m$ 时有显著影响)。

碳固定与 PD、NDVI、DEM、GRA、PRE、SLR、CLP、WLP 的条件推理树由 35 个节点组成 (图 8), WLP 是最重要的影响因素, NDVI 次之。以 WLP-0.34 为分割点, 关键交互影响组合包括 WLP+NDVI+DEM+CLP+PD、WLP+NDVI+DEM+PRE+SLR 与 WLP+NDVI+PRE+PD+GRA。比较节点 7、8、33、30、33、34 与 35 可知, 虽然 PD 增大普遍会使碳固定减少, 但是当 $GRA > 3.211^\circ$ 时, PD 增加对植被生长发育的消极影响将消减, 碳固定有所增加。比较节点 9、12、14、16、17、20、21、23、24 可知, DEM 对于碳固定的影响较大, $DEM > 126m$ 时的碳固定显著高于 $DEM \leq 126m$, 且某些高 DEM 而低 NDVI 区域的碳固定也相对较高; 另外, PRE 增大对于碳固定的促进效应会受 NDVI 限制。比较节点 12、14、16 与 17 可知, 当 $PRE \leq 1264.6mm$ 时, SLR 超过 3911.5MJ/m² 的阈

值后,其对碳固定的提升作用将减弱。

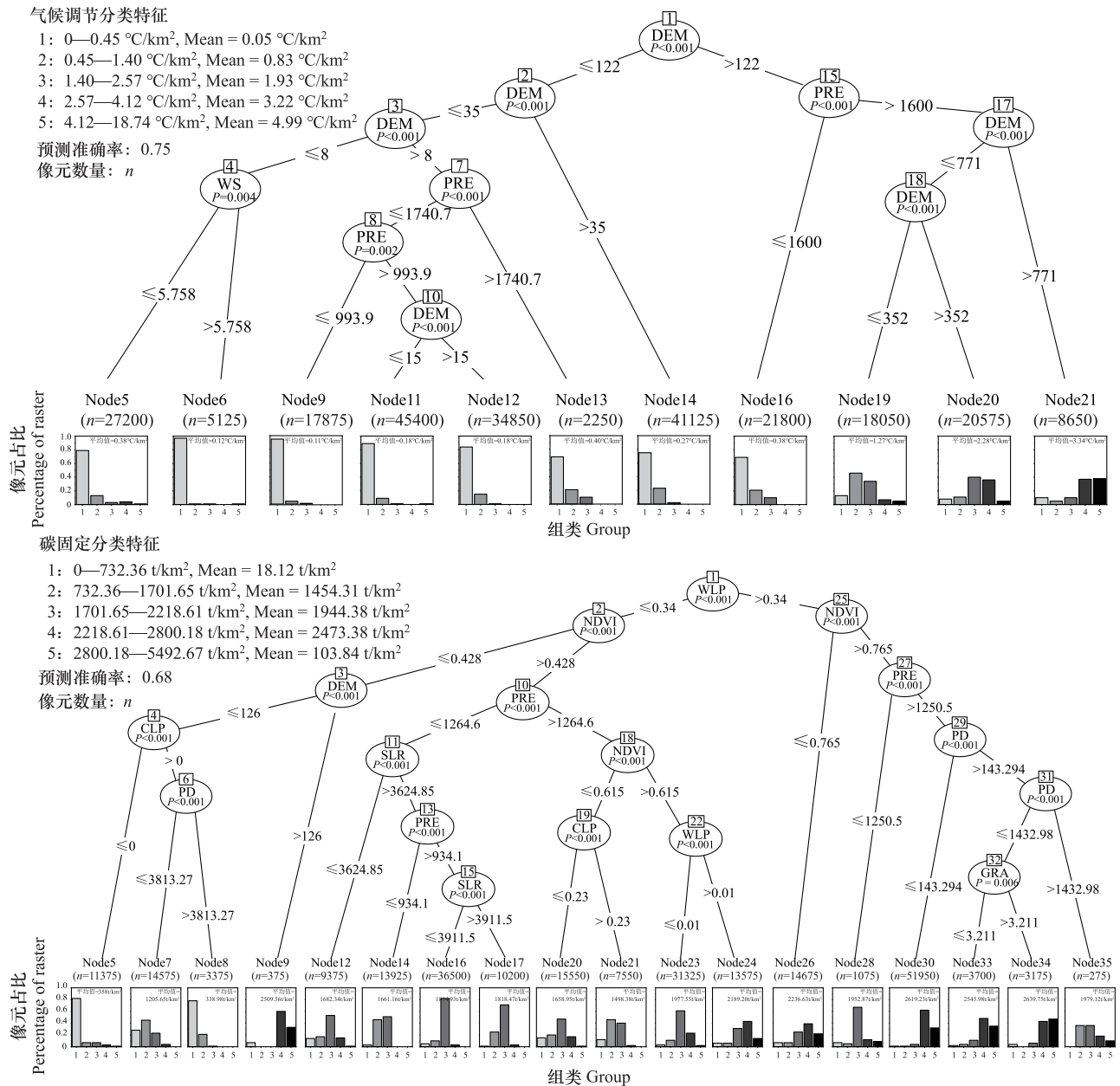


图 8 2020 年长三角地区气候调节和碳固定显著影响因素间的条件推理树

Fig.8 Conditional inference tree for climate regulation and carbon sequestration with driving factors in the YRD in 2020

Mean: 每组特征值的平均值; Node: 节点

土壤保持与 PD、NDVI、DEM、GRA、WS、PRE、SLR、ALP、WLP、SPH 的条件推理树由 39 个节点组成 (图 9), GRA 是最重要的影响因子。以 $\text{GRA}-1.978^\circ$ 为分割点, 关键交互影响组合为 $\text{GRA}+\text{DEM}+\text{WLP}+\text{PRE}$ 、 $\text{GRA}+\text{DEM}+\text{PRE}+\text{NDVI}$ 与 $\text{GRA}+\text{DEM}+\text{PRE}+\text{PD}$ 。根据土壤保持的评估原理可知, 特定区域的潜在土壤侵蚀量越多则其预期的土壤保持量越大。因此, 陡峭地势和高降雨量等增强潜在土壤侵蚀的因素反而会交互地促进土壤保持。具体而言, GRA 的增加会使 PRE 对土壤保持的提升作用明显增强, 如节点 13 ($\text{GRA} \leq 4.753^\circ$, $\text{PRE} > 1838.4\text{mm}$) 的土壤保持显著小于节点 18 ($\text{GRA} > 5.87^\circ$, $\text{PRE} > 1388.3\text{mm}$)。值得注意的是, 当 GRA 超过 9.4° 的阈值时, 土壤保持能力无法抵抗其流失风险, PRE 的增加反而会增强流失, 并且 NDVI 与 WLP 较高区域内的

GRA 与 PRE 阈值会相对更高。比较节点 22、23、31、32、33、36、38 与 39 可知,NDVI 在较低 DEM 和较高 PRE 的区域内对于土壤保持的提升更明显。

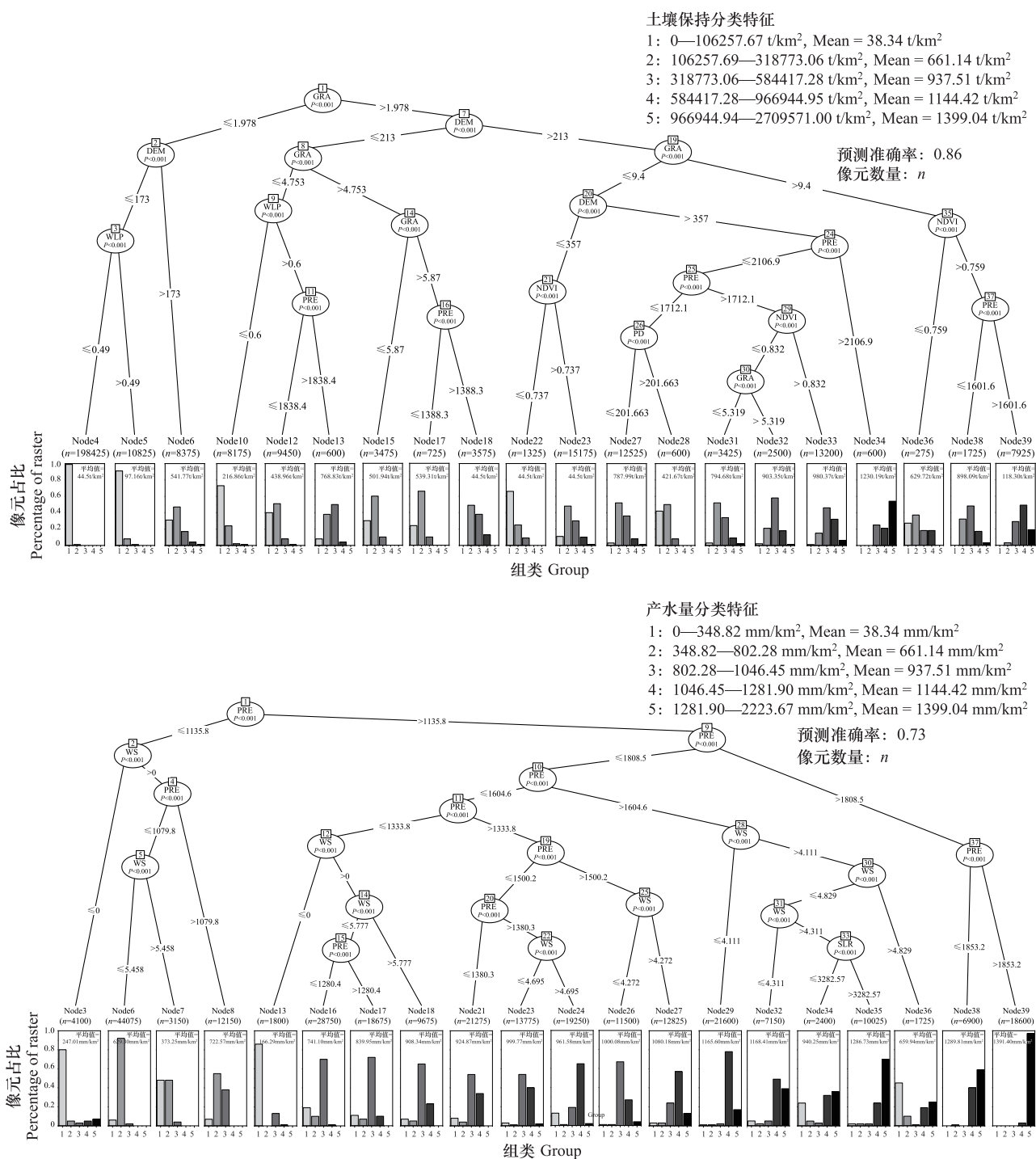


图9 2020年长三角地区土壤保持和产水量显著影响因素间的条件推理树

Fig.9 Conditional inference tree for soil retention and water yield with driving factors in the YRD in 2020

产水量与 WS、PRE、SLR 的条件推理树由 39 个节点组成(图9),PRE 是最重要的影响因子,WS 次之。以 PRE-1135.8mm 为分割点,关键交互影响组合为 PRE+WS 和 PRE+WS+SLR。具体来说,WS 对产水量的影响与 PRE 密切相关,当 PRE<1135.8mm 时,WS 的增加会使产水量有所降低;而当 PRE>1135.8mm 时,WS 的增

加则会促使产水量增长,表明 WS 和 PRE 在水分充沛的条件下会协同强化植被、土壤等因素的水分截留能力,此时水分的截留量远高于因风速增大而产生的蒸发消耗。同样地,只有当 PRE 与 WS 达到一定范围 ($1604.6\text{mm}<\text{PRE}\leq 1808.5\text{mm}$, $4.311\text{m/s}<\text{WS}\leq 4.829\text{m/s}$), SLR 对产水量的影响才会充分体现,并与 PRE、WS 呈显著的同向协同效应,共同提升产水量。

粮食生产与 PRE、SLR、ALP、SPH 的条件推理树由 19 个节点组成(图 10),ALP 是最重要的影响因素,PRE 次之。以 ALP-0.43 为分割点,关键交互影响组合为 ALP+PRE+SPH 和 ALP+PRE+SLR。比较节点 9、10

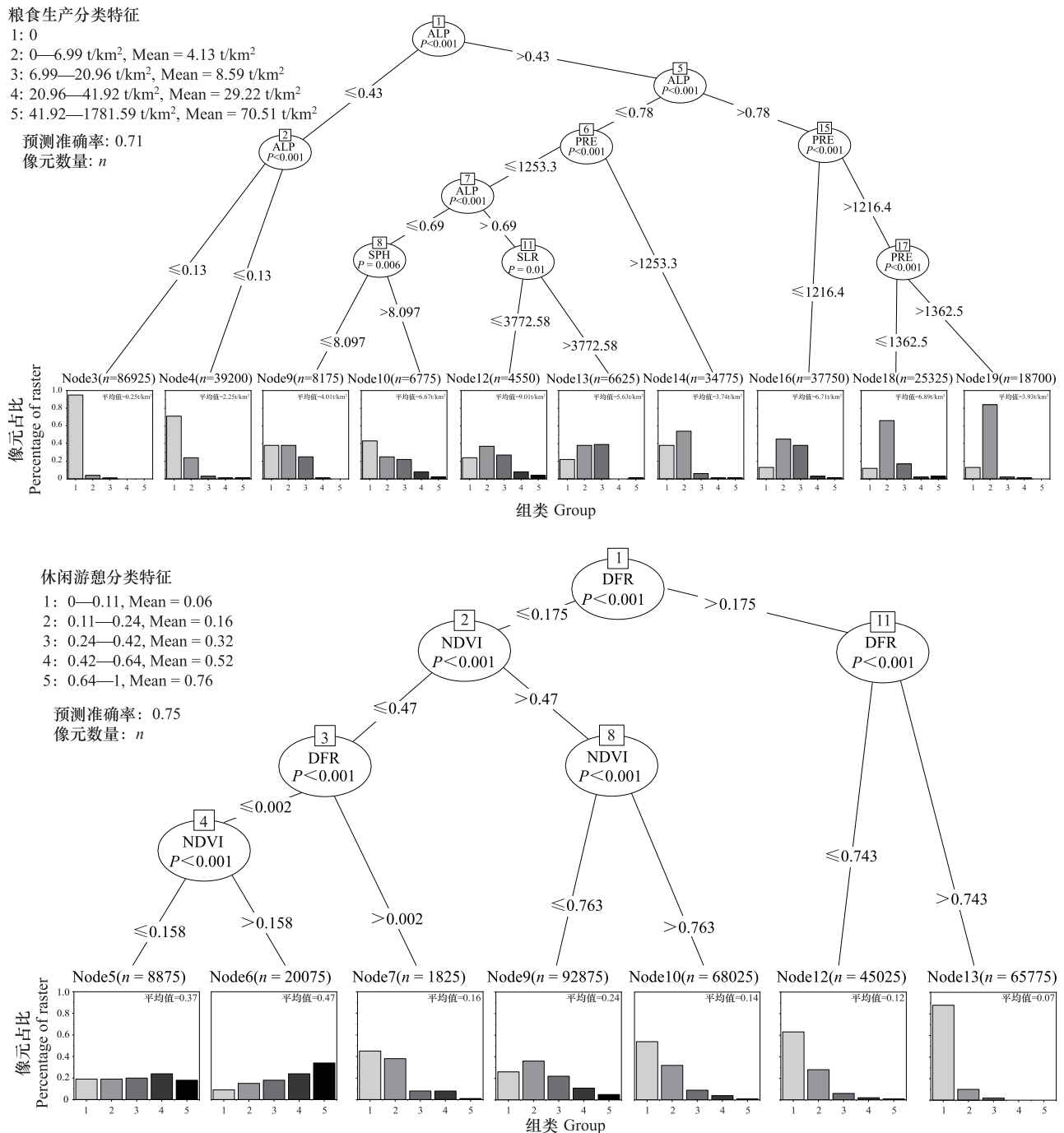


图 10 2020 年长三角地区粮食生产和休闲游憩显著影响因素间的条件推理树

Fig.10 Conditional inference tree for food production and leisure and recreation with driving factors in the YRD in 2020

或 12、13 可知,当作物种植具有一定规模且降雨量适宜时($ALP > 0.43$, $PRE \leq 1253.3\text{mm}$),SPH 与 SLR 的增大会显著提升粮食生产。

休闲游憩与 DFR、NDVI 的条件推理树由 13 个节点组成(图 10),DFR 是最重要的影响因子。比较节点 5、6、7、9、10、12 与 13 可知,当区域的交通便利程度较高时($DFR \leq 0.175\text{km}$),NDVI 对休闲游憩的影响较大,且其影响会随 DFR 增大而减小。节点 5、6、9 与 10 表明,当 DFR 相同的情况下,休闲游憩在 $NDVI \leq 0.47$ 时会随 NDVI 增大而显著提升,但休闲游憩在 $NDVI > 0.47$ 时会随 NDVI 增大而下降,NDVI 与休闲游憩的抛物线型约束线也同样反映了上述关系。

4 讨论

4.1 生态-社会经济因素对生态系统服务的非线性驱动机制

本研究整合约束线法与条件推理树,全面分析了影响长三角地区 6 种生态系统服务的 12 个生态-社会经济驱动因素的单一约束和多因素交互作用,以及它们的关键阈值。研究结果揭示了这些驱动因素对不同生态系统服务的多样化非线性约束效应,并发现特定因素的组合可能会增强或减弱单一因素的约束作用。

长三角地区的气候调节和产水量主要受地形和气候(如风速和降雨)等自然因素影响,此结果与以往研究一致^[62-63]。适宜的高程、降雨和风速条件可促进植被生长,进而增强植被的遮荫与蒸腾降温效应^[64-65]。因此,当高程、降雨量及风速未达到特定阈值(即 $DEM-1200\text{m}$ 、 $PRE-1600\text{mm}$ 、 $WS-2.8\text{m/s}$ 和 5.1m/s)时,气候调节会随着这些驱动因素的增长而显著上升;超过这些阈值后,气候调节则出现下降趋势。风速和太阳辐射作为地表水的蒸散发过程的关键因素,对产水量也表现出类似的复杂影响机制。但降雨量则持续正向地增加产水量,这是因为降雨直接关系到水输入和地表水文过程^[65]。表征人类社会经济活动分布和强度的土地利用与人口密度也对长三角地区的生态系统服务有着强烈影响,尤其对碳固定、粮食生产、休闲游憩和土壤保持。这主要归因于碳固定和粮食生产对地表植被和作物的分布与生长状况的高度依赖,而交通可达性越高的自然区域则能为人类提供更多的游憩机会。此外,过于密集的人口会抑制植被生长和扰动土壤组分结构,从而削弱土壤保持。

条件推理树分析进一步揭示了现实世界中多重因素相互交织的复杂性,这意味着在决策制定过程中,不能简单地关注单一因素的约束作用。其一,特定的自然因素组合能够增强某一自然因素对生态系统服务供应的积极影响。例如,当降雨量和风速处于一定阈值范围时($1604.6\text{mm} < PRE \leq 1808.5\text{mm}$, $4.311\text{m/s} < WS \leq 4.829\text{m/s}$),太阳辐射与降雨量和风速的协同作用将显著提升产水量;类似的,在种植面积和降雨量满足一定条件时($ALP > 0.43$, $PRE \leq 1253.3\text{mm}$),土壤理化性质和光照的改善能够有效增加粮食生产。这表明,在制定针对不同区域的生态修复与优化策略时,应全面考虑该区域内多个自然因素之间的交互机制,以确定更为高效和精准的调控方向。其二,适当的自然因素组合会削弱社会经济因素对生态系统服务供应的消极影响。例如,当坡度超过 3.211° 的阈值时,碳固定对人口密度的负面影响敏感度会降低。这意味着,尽管活跃的社会经济活动对生态系统服务具有显著的负面作用,但仍有可能通过因地制宜地实施土地利用结构调整、土壤改良和森林修复等措施,实现经济与生态的协同发展。

4.2 局限与展望

本研究尽管较准确地分析了不同生态系统服务在多因素驱动下的非线性变化及其关键阈值,但仍存在以下局限:有待深入探究产业结构和环保政策等社会经济系统因素对生态系统服务供应的影响;后续可扩大研究的时间跨度,考虑关键阈值随生态-社会经济系统的时间动态变化,以增强结果的稳健性。

5 结论

本研究评估了长三角地区 2020 年的 6 种关键生态系统服务供应,结合使用约束线法与条件推理树分析了 12 种生态-社会经济驱动因素对生态系统服务的约束作用与多重驱动因素之间的交互效应,并识别了相应

的关键影响阈值。主要结论如下:

(1) 长三角地区的 6 种生态系统服务供应具有显著的空间异质性,气候调节的高值区集中于西南森林区与各大水域,碳固定、土壤保持与产水量均大致呈“西南高、东北低”的空间格局,粮食生产的核心区集聚于中北部平原区,休闲游憩则呈“多中心聚集、圈层向外递减”的网络状格局。

(2) 12 个显著驱动因素对 6 种生态系统服务呈现出 4 类非线性(抛物线型、反指数型、正凸型和凸波型)和 2 类线性(正线型和反线型)的单一约束作用,并识别得到 32 个关键阈值。总的来看,自然因素是气候调节和产水量的关键影响因素,碳固定、土壤保持、粮食生产和休闲游憩则受主要受自然因素和社会经济因素的协同影响。其中,气候(如降雨、风速、太阳辐射)和土地利用因素对 6 种生态系统服务的影响最为强烈,且其约束作用更为复杂。

(3) 多个驱动因素对生态系统服务的约束作用存在复杂的交互效应。特定的自然因素组合不仅能够增强某一自然因素的积极效应,并有潜力削弱社会经济因素的负面作用,为区域生态系统服务的高效恢复与优化提供策略指导。

参考文献(References):

- [1] Millennium ecosystem assessment M. Ecosystems and human well-being. Island press Washington, DC, 2005.
- [2] Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco J, Melillo J M. Human domination of earth's ecosystems. *Science*, 1997, 277(5325): 494-499.
- [3] 马世发, 黎夏. 地理模拟优化系统(Geo SOS)在城市群开发边界识别中的应用. *城市与区域规划研究*, 2019, 11: 79-93
- [4] Zhang Z Y, Liu Y F, Wang Y H, Liu Y L, Zhang Y, Zhang Y. What factors affect the synergy and tradeoff between ecosystem services, and how, from a geospatial perspective? *Journal of Cleaner Production*, 2020, 257: 120454.
- [5] Fang L L, Wang L C, Chen W X, Sun J, Cao Q, Wang S Q, Wang L Z. Identifying the impacts of natural and human factors on ecosystem service in the Yangtze and Yellow River Basins. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 314: 127995.
- [6] Carter Berry Z, Jones K W, Gomez Aguilar L R, Congalton R G, Holwerda F, Kolka R, Looker N, Lopez Ramirez S M, Manson R, Mayer A, Muñoz-Villiers L, Ortiz Colin P, Romero-Urbe H, Saenz L, Von Thaden J J, Vizcaino Bravo M Q, Williams-Linera G, Asbjornsen H. Evaluating ecosystem service trade-offs along a land-use intensification gradient in central Veracruz, Mexico. *Ecosystem Services*, 2020, 45: 101181.
- [7] Xu J, Chen J, Liu Y. Partitioned responses of ecosystem services and their tradeoffs to human activities in the Belt and Road region. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 276: 123205.
- [8] Khan I, Zhao M J. Water resource management and public preferences for water ecosystem services: a choice experiment approach for inland river basin management. *Science of The Total Environment*, 2019, 646: 821-831.
- [9] Smith R I, Barton D N, Dick J, Haines-Young R, Madsen A L, Rusch G M, Termansen M, Woods H, Carvalho L, Giucă R C, Luque S, Odee D, Rusch V, Saarikoski H, Adamescu C M, Dunford R, Ochieng J, Gonzalez-Redin J, Stange E, Vădineanu A, Verweij P, Vikström S. Operationalising ecosystem service assessment in Bayesian Belief Networks: experiences within the OpenNESS project. *Ecosystem Services*, 2018, 29: 452-464.
- [10] He S Y, Gallagher L, Su Y, Wang L, Cheng H G. Identification and assessment of ecosystem services for protected area planning: a case in rural communities of Wuyishan National Park pilot. *Ecosystem Services*, 2018, 31: 169-180.
- [11] Wang S J, Liu Z T, Chen Y X, Fang C L. Factors influencing ecosystem services in the Pearl River Delta, China: Spatiotemporal differentiation and varying importance. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 168: 105477.
- [12] Peng J, Hu X X, Wang X Y, Meersmans J, Liu Y X, Qiu S J. Simulating the impact of Grain-for-Green Programme on ecosystem services trade-offs in Northwestern Yunnan, China. *Ecosystem Services*, 2019, 39: 100998.
- [13] 方露露, 许德华, 王伦澈, 牛自耕, 张明. 长江、黄河流域生态系统服务变化及权衡协同关系研究. *地理研究*, 2021, 40(3): 821-838.
- [14] Guo Q F, Rundel P W. Self-thinning in early postfire chaparral succession: mechanisms, implications, and a combined approach. *Ecology*, 1998, 79(2): 579.
- [15] Thomson J D, Weiblen G, Thomson B A, Alfaro S, Legendre P. Untangling multiple factors in spatial distributions: lilies, gophers, and rocks. *Ecology*, 1996, 77(6): 1698-1715.
- [16] Sannigrahi S, Zhang Q, Pilla F, Joshi P K, Basu B, Keesstra S, Roy P S, Wang Y, Sutton P C, Chakraborti S, Paul S K, Sen S. Responses of ecosystem services to natural and anthropogenic forcings: a spatial regression based assessment in the world's largest mangrove ecosystem. *Science of The Total Environment*, 2020, 715: 137004.

- [17] Liu Q, Qiao J J, Li M J, Huang M J. Spatiotemporal heterogeneity of ecosystem service interactions and their drivers at different spatial scales in the Yellow River Basin. *Science of The Total Environment*, 2024, 908: 168486.
- [18] Guo S S, Wu C Y, Wang Y H, Qiu G Q, Zhu D, Niu Q, Qin L. Threshold effect of ecosystem services in response to climate change, human activity and landscape pattern in the upper and middle Yellow River of China. *Ecological Indicators*, 2022, 136: 108603.
- [19] Yushanjiang A, Zhang F, Yu H, Kung H t. Quantifying the spatial correlations between landscape pattern and ecosystem service value: A case study in Ebinur Lake Basin, Xinjiang, China. *Ecological Engineering*, 2018, 113: 94-104.
- [20] 乐荣武, 李巍, 周思杨, 宋南奇. 呼包鄂榆城市群生态系统服务价值驱动因素及其交互效应. *生态学报*, 2023, 43(23): 9967-9980.
- [21] Sahani N, Ghosh T. GIS-based spatial prediction of recreational trail susceptibility in protected area of Sikkim Himalaya using logistic regression, decision tree and random forest model. *Ecological Informatics*, 2021, 64: 101352.
- [22] Bou Kheir R, Greve M H, Abdallah C, Dalgaard T. Spatial soil zinc content distribution from terrain parameters: a GIS-based decision-tree model in Lebanon. *Environmental Pollution*, 2010, 158(2): 520-528.
- [23] Wang S, Liu Y, Cairano-Gilfedder C D, Titmus S, Naim M M, Syntetos A.A. Reliability Analysis for Automobile Engines: Conditional Inference Trees. *Procedia The International Academy for Production Engineering*, 2018, 72: 1392-1397.
- [24] White A P, Liu W Z. Bias in information-based measures in decision tree induction. *Machine Learning*, 1994, 15(3): 321-329.
- [25] Hothorn T, Hornik K, Zeileis A. Unbiased recursive partitioning: a conditional inference framework. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 2006, 15(3): 651-674.
- [26] 方创琳, 姚士谋, 刘盛和. 2010 中国城市群发展报告. 北京: 科学出版社, 2011.
- [27] Zhang M D, Xiao H, Sun D Q, Li Y. Spatial differences in and influences upon the sustainable development level of the Yangtze River Delta urban agglomeration in China. *Sustainability*, 2018, 10(2): 411.
- [28] Liang Y, Cai W G, Ma M D. Carbon dioxide intensity and income level in the Chinese megacities' residential building sector: decomposition and decoupling analyses. *Science of The Total Environment*, 2019, 677: 315-327.
- [29] Ma M D, Cai W, Cai W G, Dong L. Whether carbon intensity in the commercial building sector decouples from economic development in the service industry? Empirical evidence from the top five urban agglomerations in China. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 222(3): 193-205.
- [30] Gao J H, Sun Y Z, Liu Q Y, Zhou M G, Lu Y G, Li L P. Impact of extreme high temperature on mortality and regional level definition of heat wave: a multi-city study in China. *Science of The Total Environment*, 2015, 505: 535-544.
- [31] Chen Z Q, Yu B L, Yang C S, Zhou Y Y, Yao S J, Qian X J, Wang C X, Wu B, Wu J P. An extended time series (2000—2018) of global NPP-VIIRS-like nighttime light data from a cross-sensor calibration. *Earth System Science Data*, 2021, 13(3): 889-906.
- [32] 荆文龙, 冯敏, 杨雅萍. 一种 NCEP/NCAR 再分析气温数据的统计降尺度方法. *地球信息科学学报*, 2013, 15(6): 819-828.
- [33] Peng S, Ding Y, Liu W, Li Z. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017. *Earth System Science Data*, 2019, 11(4): 1931-1946.
- [34] 王晓娟, 孔繁花, 尹海伟, 徐海龙, 李俊生, 蒲英霞. 高温天气植被蒸腾与遮荫降温效应的变化特征. *生态学报*, 2018, 38(12): 4234-4244.
- [35] 刘维, 周忠学, 郎睿婷. 城市绿色基础设施生态系统服务供需关系及空间优化——以西安市为例. *干旱区地理*, 2021, 44(5): 1500-1513.
- [36] Huang Y T, Cao Y R, Wu J Y. Evaluating the spatiotemporal dynamics of ecosystem service supply-demand risk from the perspective of service flow to support regional ecosystem management: A case study of Yangtze River Delta urban agglomeration. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 460: 142598.
- [37] Ruimy A, Saugier B, Dedieu G. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1994, 99(D3): 5263-5283.
- [38] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, Falkowski P. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 1998, 281(5374): 237-240.
- [39] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 413-424.
- [40] Angstrom A. Solar and atmospheric radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1924, 20: 6121-6126
- [41] Duffie J A, Beckman W A. *Solar Radiation. Solar engineering of thermal processes*. 2013.
- [42] Zhang Q. Typical Weather Year Data and Regional Characteristics of Heating and Cooling Loads for in China. China: Proceedings of 2 International Workshop on Energy and Environment of Residential Buildings, 2002.
- [43] Allan R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [44] 纪强, 王治国, 张超. 基于功能评价的水土保持需求分析. 中国水土保持学会水土保持规划设计专业委员会年会, 2014.

- [45] 张科利, 彭文英, 杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算. 土壤学报, 2007, 44(1): 7-13.
- [46] 吴一帆, 张璇, 李冲, 郝芳华, 殷国栋. 生态修复措施对流域生态系统服务功能的提升——以潮河流域为例. 生态学报, 2020, 40(15): 5168-5178.
- [47] 常畅, 王耕. 基于 InVEST 模型的碧流河流域水土保持功能研究. 国土与自然资源研究, 2019(4): 8-10.
- [48] 许丁雪, 吴芳, 何立环, 刘海江, 江源. 土地利用变化对生态系统服务的影响——以张家口-承德地区为例. 生态学报, 2019, 39(20): 7493-7501.
- [49] 燕玲玲, 巩杰, 徐彩仙, 曹二佳, 李红瑛, 高秉丽, 李焱. 子午岭地区水土保持服务时空变化及其影响因素. 水土保持学报, 2021, 35(1): 188-197.
- [50] 陈童尧, 贾燕锋, 王佳楠, 张宇, 李萍, 刘楚颖. 基于 InVEST 模型的祁连山国家级自然保护区水土保持现状与功能. 干旱区研究, 2020, 37(1): 150-159.
- [51] 李士美, 谢高地, 张彩霞, 盖力强. 森林生态系统水源涵养服务流量过程研究. 自然资源学报, 2010, 25(4): 585-593.
- [52] 傅斌, 徐佩, 王玉宽, 彭怡, 任静. 都江堰市水源涵养功能空间格局. 生态学报, 2013, 33(3): 789-797.
- [53] 王保盛, 陈华香, 董政, 祝薇, 邱全毅, 唐立娜. 2030 年闽三角城市群土地利用变化对生态系统水源涵养服务的影响. 生态学报, 2020, 40(2): 484-498.
- [54] Ju W M, Gao P, Zhou Y L, Chen J M, Chen S, Li X F. Prediction of summer grain crop yield with a process-based ecosystem model and remote sensing data for the northern area of the Jiangsu Province, China. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(6): 1573-1587.
- [55] 孙泽祥, 刘志锋, 何春阳, 邬建国. 中国北方干燥地城市扩展过程对生态系统服务的影响——以呼和浩特-包头-鄂尔多斯城市群地区为例. 自然资源学报, 2017, 32(10): 1691-1704.
- [56] Halvorsen R, Mazzoni S, Dirksen J W, Næsset E, Gobakken T, Ohlson M. How important are choice of model selection method and spatial autocorrelation of presence data for distribution modelling by MaxEnt? Ecological Modelling, 2016, 328: 108-118.
- [57] Paracchini M L, Zulian G, Kopperoinen L, Maes J, Schägner J P, Termansen M, Zandersen M, Perez-Soba M, Scholefield P A, Bidoglio G. Mapping cultural ecosystem services: a framework to assess the potential for outdoor recreation across the EU. Ecological Indicators, 2014, 45: 371-385.
- [58] 姜芳茗, 徐志红, 王建锋, 游诗雪, 沈少泽, 岑庆, 邓劲松. 国土空间复合生态功能识别与分区——以浙江省湖州市为例. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2022, 48(2): 227-239.
- [59] 国家发展改革委环境保护部. 生态保护红线划定指南. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201707/t20170728_418679.html, 2017-07-20/2021-11-05.
- [60] 郝蕊芳, 于德永, 邬建国, 郭勤峰, 刘宇鹏. 约束线方法在生态学研究中的应用. 植物生态学报, 2016, 40(10): 1100-1109.
- [61] Hao R F, Yu D Y, Wu J G. Relationship between paired ecosystem services in the grassland and agro-pastoral transitional zone of China using the constraint line method. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2017, 240: 171-181.
- [62] Wang H, Liu L B, Yin L, Shen J S, Li S C. Exploring the complex relationships and drivers of ecosystem services across different geomorphological types in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China (2000—2018). Ecological Indicators, 2021, 121: 107116.
- [63] Zhao W, Li A N, Huang Q X, Gao Y N, Li F J, Zhang L B. An improved method for assessing vegetation cooling service in regulating thermal environment; a case study in Xiamen, China. Ecological Indicators, 2019, 98: 531-542.
- [64] Wang X Z, Wu J Z, Liu Y L, Hai X Y, Shangguan Z P, Deng L. Driving factors of ecosystem services and their spatiotemporal change assessment based on land use types in the Loess Plateau. Journal of Environmental Management, 2022, 311: 114835.
- [65] Zhang X, Zhang G S, Long X, Zhang Q, Liu D S, Wu H J, Li S. Identifying the drivers of water yield ecosystem service; a case study in the Yangtze River Basin, China. Ecological Indicators, 2021, 132: 108304.