

DOI: 10.5846/stxb202103020565

王枫, 宋同清, 杜虎, 张家涌, 陈惠君, 彭晚霞. 中国南海北部不同岛屿植被与土壤的耦合协调发展度. 生态学报, 2023, 43(8): 3319-3326.

Wang F, Song T Q, Du H, Zhang J Y, Chen H J, Peng W X. Coupling coordinative degree of vegetation and soil in different islands in the north of South Sea, China. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(8): 3319-3326.

中国南海北部不同岛屿植被与土壤的耦合协调发展度

王 枫^{1, 2}, 宋同清^{1, 2, *}, 杜 虎^{1, 2}, 张家涌^{1, 2, 3}, 陈惠君^{1, 2}, 彭晚霞^{1, 2}

1 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125

2 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 环江 547100

3 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128

摘要: 植被和土壤是陆地生态系统两个重要的组成部分, 二者相互影响相互促进, 探明两者的耦合协调关系是生态恢复与重建的顺利实施的关键。基于中国南海北部大庙墩岛、涠洲岛、大汉三墩岛、甘蔗岛和蜈支洲岛等个海岛的典型植被群落植被土壤的全面调查和取样分析, 建立 10 个植被因子和 14 个土壤因子的 2 级层次指标体系, 采用层析分析法确定各因子的权重, 构建 5 个海岛植被土壤耦合度和耦合协调度模型。结果表明, 不同岛屿的植被土壤耦合度和耦合协调度模型并不完全对应, 植被与土壤的综合指数在不同岛屿中也不完全一致, 甘蔗岛的植被效应和大汉三墩岛的土壤效应最佳。中国南海北部 5 个岛屿的植被土壤耦合协调状况较好, 均处于初、中级协调发展状态, 且除甘蔗岛外处于植被土壤同步型。总的来说, 由于岛屿远离内陆, 人类干扰相对较小, 在植被土壤长期的演替过程中, 中国南海北部岛屿植被土壤耦合协调较好, 在其恢复与生态重建时要注重提高植物多样性、抚育水平和土壤管理水平。

关键词: 植被; 土壤; 耦合协调发展; 岛屿; 中国南海

Coupling coordinative degree of vegetation and soil in different islands in the north of South Sea, China

WANG Feng^{1, 2}, SONG Tongqing^{1, 2, *}, DU Hu^{1, 2}, ZHANG Jiayong^{1, 2, 3}, CHEN Huijun^{1, 2}, PENG Wanxia^{1, 2}

1 Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China

2 Huanjiang Observation and Research Station of Karst Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang 547100, China

3 College of Resource and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China

Abstract: Vegetation and soil are two important components of the terrestrial ecosystems. There is to some extent an interaction between vegetation and soil systems and they influence each other. Therefore, exploring the coupling coordinative relationship between vegetation and soil could be the key to successful implementation of ecological restoration and reconstruction in the terrestrial ecosystems. The islands of the South Sea in China are located on the edge of the world's largest tropical-subtropical shelf, which are an inalienable part of China's territory. Due to clear boundaries and isolation from the land, islands are faced with problems such as strong habitat heterogeneity, lack of plant germplasm resources and fresh water, large evaporation, and so on. They are special and independent ecosystems which are more vulnerable to extreme climates or natural disasters such as typhoons, and become easily degraded but difficultly to be restored. This paper is based on the comprehensive investigation and systematic determination between vegetation and soil systems in the typical vegetation communities on five islands in the northern South Sea, China, i.e., Damiaodun Island, Weizhou Island, Dahan

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA13010302); 国家自然科学基金项目(31770495, 31870712, 31971487)

收稿日期: 2021-03-02; **网络出版日期:** 2022-12-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: songtongq@163.com

Sandun Island, Ganzhe Island, and Wuzhizhou Island. The two-level index system combined with 10 vegetation factors and 14 vegetation factors were established to determine the weight of each factor by the analytic hierarchy process, and then to build coupling models and coupling coordination models of vegetation and soil systems in the five islands. The results showed that the vegetation-soil coupling models and coupling coordination models in different islands were not completely corresponding. In addition, the comprehensive indexes of vegetation and soil were not completely consistent in each island. The vegetation effect of Ganzhe Island and the soil effect of Dahansandun Island were the best, respectively. The coupling coordinative status of vegetation and soil was good in the five islands in the northern of South Sea, China, which were in a state of primary or intermediate coordinated development. All the islands were in the synchronization type of vegetation and soil except Ganzhe Island. In general, due to islands far from land with relative small human interference, during the long-term succession of vegetation and soil, the coupling coordination between vegetation and soil systems in the northern islands of the South Sea of China was in a good status. Therefore, special attention should be paid to improve plant diversity, tending level, and soil management level during the process of vegetation restoration and ecological reconstruction in the northern islands of the South Sea of China.

Key Words: vegetation; soil; coupling coordinated development; islands; South Sea in China

植物和土壤是一个耦合系统,植物系统在塑造土壤系统中发挥了重要作用^[1-2],让人们认识到植被-土壤存在着相互反馈作用。植物系统与土壤系统具有错综复杂的正负反馈^[3],主要表现在:一方面,土壤通过根际界面为植物水分和养分吸收与转运以及生长发育提供必需的土壤理化环境和生物环境(微生物、食物网等),从而调控植物生长、凋落物生产和植被群落演替方向与进展^[4-5];另一方面,植物通过“凋落物-土表”界面输入地上凋落物并进行分解,增加土壤有机质,促进土壤形成与发育,为土壤生物生长提供有机养分^[6-7]。耦合最早应用在物理学上,后被推而广之,应用到社会科学领域中,人们通过对具有耦合关系的系统进行引导、强化,促进两者良性的、正向的相互作用,相互影响,激发两者内在潜能,从而实现两者优势互补和共同提升^[8-9]。将子系统进行耦合的过程称为协调发展,新形成的整体系统能够克服原先单个子系统的发展局限性,将其优势进行互补和融合^[10]。目前涉及系统耦合模型和耦合协调模型的研究较多,但均侧重于生态承载力与生态功能^[11]、城镇化与生态环境^[12-13]、生态与经济系统^[14]、生态环境脆弱性与贫困^[15-16]等,方法和理论比较成熟。因此,应用其相对完善的理论和模型开展陆地脆弱生态系统植被土壤耦合协调机制研究,对脆弱生态系统生态修复与重建及其可持续发展理论具有科学价值。

中国南海海岛位于世界上最大的热带-亚热带陆架边缘海^[17],是中国领土不可分割的一部分,对巩固中国海航、维护海洋权益、支撑“经略南海、一带一路”等国家战略等具有重要的作用^[18-19]。岛屿由于界限明确,与陆地隔离,面临着生境异质性强、植物种质资源少、淡水缺乏、蒸发量大等问题,更易受到台风等极端气候或自然灾害的影响^[20-21],成为极易退化却难以恢复的特殊、独立的生态系统^[22]。中国南海岛屿系统是一个异质性较强、开放的系统,各子系统之间不断进行着物质、能量和信息等的流动,其中植被和土壤是岛屿生态系统两个最重要的子系统,它们的协调发展程度直接关系到岛屿生态系统的可持续性。因此,开展中国南海岛屿脆弱生态系统的植被恢复与生态重建刻不容缓。本文基于中国南海北部大汉三墩岛、大庙墩岛、甘蔗岛、涠洲岛和蜈支洲岛 5 个近岸海岛典型植物群落植被与土壤调查,构建了中国南海北部岛屿植被土壤耦合度和耦合协调度模型,为海岛脆弱生态系统植被的迅速恢复、生态重建以及优化设计提供科学的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于我国南海北部近岸海岛,从北至南依次选取了广西省的大庙墩岛和涠洲岛,广东省的大汉三墩岛,海南省的甘蔗岛与蜈支洲岛 5 个典型海岛(18°18'—21°35'N, 108°44'—110°29'E)。年平均降雨量范围

1485—2590 mm,年平均气温为 22.7—25.2 ℃。大庙墩岛西北部地势平坦,中部坡地最高点海拔为 21 m,岛屿类型为基岩岛,主要植被群落类型为木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)、楝树(*Melia azedarach*)。涠洲岛中北部地势较为低平,中南部地势较高,最高海拔 79 m,岛屿类型为火山岛,主要群落类型有木麻黄、银合欢(*Leucaena leucocephala*)与台湾相思(*Acacia confusa*)。大汉三墩岛地势平坦,平均海拔为 11 m,岛屿类型为沉积岛,植被群落类型为木麻黄。甘蔗岛海岛以大片花岗岩为基部,典型的基岩岛,为中间高四周低的锥形状,岛内最高峰 69 m,主要群落为草海桐(*Scaevola taccada*)、露兜树(*Pandanus tectorius*)。蜈支洲岛整体海拔较高,中南部最高峰海拔 80 m,南部沿海为险峻陡崖,西北部沿海地势渐平,主要群落类型有海南大风子(*Hydnocarpus hainanensis*)。

1.2 样地设置与调查与土壤取样分析

样地设置与调查:5 个海岛共设置 36 个标准样地,森林、灌丛、草丛调查时分别以 20 m×20 m、10 m×10 m、1 m×1 m 的样方为基本单元。乔木层调查胸径(DBH)≥1 cm 的个体,记录树种名称、树高、胸径;灌木层在乔木层样地内设置 4 个 2 m×2 m 的次级样方,调查所有灌木物种名、株丛数、高度、基径;草本层在次级样方内按“品”字型在样地内设置 3 个 1 m×1 m 的小样方调查草本种类、株丛数、覆盖度、平均高度。根据调查结果计算物种丰富度、Shannon 指数、Simpson 指数和均匀度指数,计算公式详见参考文献^[23]。

植物功能性状与叶片养分测定:功能性状调查与测定参照 Comelissen 等编写的《植物性状测量手册》^[24]:在同一个样地内,每个物种选取 3 个个体,分别在无明显遮荫的树冠处,选择 3—5 个不同方位的枝条,分为 3 分装进密封袋中带回驻地进行扫描测定。叶绿素采用 SPAD 值,通过 SPAD-502 直接测定,采取叶片与功能性状相同,每个物种选取 3 个个体,每个个体共测 5 片叶片,每片叶片测定三次后在仪器内取平均值。选择无虫孔和损坏的完好叶片,共摘取 50 g 成熟叶片利用万深扫描仪进行叶面积扫描,在万深 LA-S 系列植物图像分析系统中计算叶面积;叶片测厚仪测量叶片厚度(LT),露兜树等植物采用游标卡尺;完成叶面积与叶片厚度测量后依次分 3 袋装入信封以 50 ℃杀青,并寄回实验室,放入烘箱 75 ℃烘制 48h 后称量成熟叶片干重,计算比叶面积(SLA);叶片样品经过球磨仪器磨碎后然后过 100 目筛,测定叶片碳(C)、氮(N)、磷(P)含量。所有植物功能性状值以物种丰度为权重,通过加权平均值计算得出结果。

土壤采集与测定:在样方中按“S”形随机设置 5 个采样点,清理每个采样点土表凋落物后用直径 5 cm 的土钻取表层(0—20 cm)土壤,样品充分混匀后按四分法分成两部分,清除杂物后过 2 mm 筛,一部分带回驻地寄回实验室风干研磨待测含盐量、pH、土壤有机质(SOM)、全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、碱解氮(AN)、速效钾(AK),分析方法参考文献^[25];另一部分取 50 g 左右放入液氮罐,回实验室后存放-80 ℃冰箱,提取后委托上海美吉生物医药科技有限公司测定土壤微生物(细菌和真菌)多样性,另外取 300 g 左右密封后放入冰盒,带回实验室,用熏蒸法测定土壤微生物生物量 C、N、P^[26];在采样点旁边同时用环刀取样,回实验室用烘箱烘干测定土壤容重。

1.3 模型建立

耦合度指系统之间相互影响的一种关联强度与秩序^[27],可以用来衡量两个或两个以上的系统或要素之间协调状况好坏^[16,28]。量化各系统指标对系统的综合评价至关重要^[29]。参照物理学的容量耦合系数模型^[30],设正数 $X_1, X_2, \dots, X_p$ 为描述植物特征的 p 个指标,正数 $Y_1, Y_2, \dots, Y_q$ 描述土壤特征的 q 个指标,引申得出本文植被系统和土壤系统的耦合度模型为

$$C = \left\{ \frac{f(x)g(y)}{\left(\frac{f(x) + g(y)}{2} \right)^2} \right\}^k \quad (1)$$

式中, C 为中国南海北岛植被土壤系统耦合度, k 为调节系数,一般情况下, $2 \leq k \leq 5$,为增加区分度,参考彭晚霞等^[28]本文选取 $k=5$ 。耦合度 C 反映了当 $f(x)$ 与 $g(y)$ 之和在一定的条件下,植被土壤耦合协调的数量程度。显然, $0 \leq C \leq 1$,当 C 越接近 1,说明系统之间或系统内部各要素之间的共振耦合状态越好;当 C 越接近

0,说明系统之间或系统要素之间相关性越差,耦合度越小。 $f(x)$ 为植被综合评价函数, $g(y)$ 为土壤综合评价函数,公式如下:

$$f(x) = \sum_{i=1}^p a_i X_i \quad (2)$$

$$g(y) = \sum_{j=1}^q b_j Y_j \quad (3)$$

$$X_i = (x_i - \min x_i) / (\max x_i - \min x_i) \quad (4)$$

$$Y_j = (y_j - \min y_j) / (\max y_j - \min y_j) \quad (5)$$

式中, i, j 分别为植被和土壤环境特征的指标个数, a_i, b_j 为指标待定权重值, x_i, y_j 为植被特征的第*i*个指标的标准化值和土壤环境特征的第*j*个指标的标准化值,采用正值 X_i, Y_i ^[31],其值介于0—1之间,然后利用指标权重与量化值计算综合评价指数。 $f(x)$ 或者 $g(y)$ 的综合指数越高,表明植被生长状况或土壤环境越好,反之亦然。

耦合度*C*仅代表两者之间相互作用力的大小,难以全面和准确地反映植被与土壤两个子系统在系统中的整体“功效”与“协同”效应,因此,为进一步反映中国南海北部不同岛屿植被与土壤相互耦合的协调发展程度,引入耦合协调度模型:

$$D = \sqrt{C \times T}, T = \alpha f(x) + \beta g(y) \quad (6)$$

式中, D 为中国南海北部岛屿植被土壤系统的耦合协调度。 T 为植被与土壤两者的综合调和指数,它反映了植被与土壤系统之间的整体协同效应或贡献; α, β 为待定权数,由于岛屿生态系统中植被生长与土壤环境的改善同等重要,所以,本文取 $\alpha = \beta = 0.5$ 。显然, C, D 均取值 $[0, 1]$,耦合发展度*D*是表征系统植被与土壤相互耦合协调程度的指标,其值越高,表明植被生长与土壤环境的总体水平越高,即植被生长与土壤环境之间的耦合关系越协调。本文借鉴前人的研究成果^[28],根据研究区的是实际情况和研究需要,将耦合协调度划分为3类: $0 < D \leq 0.4$,失调衰退阶段; $0.4 < D \leq 0.6$,过渡发展阶段; $0.6 < D \leq 1$,协调发展阶段。为了对植被与环境耦合协调发展变化关系有更加清晰的认识,孙黄平等^[32]、李琳等^[33]、黄冬梅等^[12]将城镇化与生态环境耦合协调关系划分为6、7个阶段,不利于从时序上对耦合协调值进行比较分析,故本研究进一步细分耦合协调过程,参考马亚亚等^[14]、彭晚霞等^[28]、方传棣^[34],划分为极度失调($0 < D \leq 0.1$)、严重失调($0.1 < D \leq 0.2$)、中度失调($0.2 < D \leq 0.3$)、轻度失调($0.3 < D \leq 0.4$)、濒临失调($0.4 < D \leq 0.5$)、勉强协调($0.5 < D \leq 0.6$)、初级协调($0.6 < D \leq 0.7$)、中级协调($0.7 < D \leq 0.8$)、良好协调($0.8 < D \leq 0.9$)和优质协调($0.9 < D \leq 1.0$)十个阶段。

1.4 指标体系的建立和权重的确定

考虑到指标选取的代表性、客观性、简明性、可操作性、规范性、灵敏性、独立性和协调性的原则,结合中国南海北部岛屿植被与土壤的实际,借鉴相关研究成果^[18, 20, 28],从植被和土壤2个子系统的关系出发,构建能够反映中国南海北部不同岛屿生态系统植被土壤耦合协调评判的2级层次指标系统。权重模型采用层次分析法^[33],将各指标数据通过规格化方法进行标准化处理后,用可将多维的非线性问题简化成一维线性叠加的分析法。应用主成分分析方法,确定主要各系统因子个数,获得第一层每个指数的权重;最底层为要素层,是隶属于上层的各个评价指标,每个要素公因子方差值与上层评价指标的方差值和的比值,即为其所占权重;综合权重为某要素的权重与在第一层指数权重的积。每一层里2个元素进行相对于上层某元素的重要性相比,建立起每层的对比矩阵,并且通过一致性检验后^[22, 35],计算得表1所示各因子的权重。

1.5 数据处理与分析

所有数据使用Excel 2016处理,并运用SPSS 18.0软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 植被土壤耦合类型的分类体系及评判标准

根据耦合协调度*D*的大小,结合植被综合评价函数 $f(x)$ 和土壤环境综合评价函数 $g(y)$ 的大小,提出中

国南海北部岛屿生态系统植被土壤耦合协调类型及评判标准(表2)。先根据 D 值大小将中国南海北部岛屿生态系统植被与土壤的协调发展状况分为 3 大类 10 小类,然后再根据 $f(x)$ 和 $g(y)$ 的对比关系划分为 30 种植被土壤基本耦合类型。从中可看出,耦合作用的强度与耦合协调程度并不是一一对应的,它们之间存在着交错分布的特点,这与自然恢复过程中植被与土壤子系统之间的协调发展规律是相符合的。

表 1 中国南海北部不同岛屿植被与土壤耦合协调度评价指标权重

Table 1 Index weight of coupling coordination degree between vegetation and soil in different islands of northern South China Sea

项目 Items	第一层次 The first layer		第二层次 The second layer		综合权重 Comprehensive weight
	指数 Index	权重 Weight	指标 Index	权重 Weight	
植物综合指数 Plant comprehensive index (P)	植物多样性(C_1)	0.4966	物种数(X_1)	0.2574	0.1278
			Simpson 指数(X_2)	0.2748	0.1365
			Shannon 指数(X_3)	0.2914	0.1447
			均匀度(X_4)	0.1763	0.0876
	养分效应(C_2)	0.2054	叶片有机碳(X_5)	0.4303	0.0884
			叶片氮含量(X_6)	0.2540	0.0522
			叶片磷含量(X_7)	0.3157	0.0648
	功能性状(C_3)	0.2979	叶绿素相对含量(X_8)	0.2403	0.0716
			叶片厚度(X_9)	0.4036	0.1202
			比叶面积(X_{10})	0.3561	0.1061
土壤综合指数 Soil comprehensive index (S)	理化性状(C_4)	0.5905	土壤容重(Y_1)	0.0989	0.0584
			土壤 pH 值(Y_2)	0.1092	0.0645
			有机质(Y_3)	0.1045	0.0617
			全氮(Y_4)	0.0480	0.0283
			全磷(Y_5)	0.2163	0.1277
			全钾(Y_6)	0.0631	0.0373
			碱解氮(Y_7)	0.0776	0.0458
			速效钾(Y_8)	0.1059	0.0625
			土壤含盐量(Y_9)	0.1764	0.1042
			微生物生物量碳(Y_{10})	0.2645	0.0768
	微生物性状(C_5)	0.4095	微生物生物量氮(Y_{11})	0.1792	0.0521
			微生物生物量磷(Y_{12})	0.0962	0.0279
			细菌 Shannon 指数(Y_{13})	0.2462	0.0715
			真菌 Shannon 指数(Y_{14})	0.2141	0.0622

表 2 植被土壤系统耦合类型划分标准

Table 2 Classification criteria for coupling coordination types of vegetation and soil

耦合协调度 D Coupling coordinative degree		水平分类 Division types	$f(x)$ 与 $g(y)$ 的对比关系 Comparison relationships between $f(x)$ to $g(y)$	植被土壤耦合模式 Coupling models of vegetation and soil
失调衰退类 Disordered decline type	$0 < D \leq 0.1$	极度失调衰退类	$f(x)/g(y) > 1.2$	极度失调衰退类植被损益型
			$0.8 \leq f(x)/g(y) \leq 1.2$	极度失调衰退类植被土壤共损型
			$f(x)/g(y) < 0.8$	极度失调衰退类土壤损益型
	$0.1 < D \leq 0.2$	严重失调衰退类	$f(x)/g(y) > 1.2$	严重失调衰退类植被损益型
			$0.8 \leq f(x)/g(y) \leq 1.2$	严重失调衰退类植被土壤共损型
			$f(x)/g(y) < 0.8$	中度失调衰退类土壤损益型
	$0.2 < D \leq 0.3$	中度失调衰退类	$f(x)/g(y) > 1.2$	中度失调衰退类植被损益型
			$0.8 \leq f(x)/g(y) \leq 1.2$	中度失调衰退类植被土壤共损型

续表

耦合协调度 <i>D</i> Coupling coordinative degree	水平分类 Division types	<i>f</i> (<i>x</i>) 与 <i>g</i> (<i>y</i>) 的对比关系 Comparison relationships between <i>f</i> (<i>x</i>) to <i>g</i> (<i>y</i>)	植被土壤耦合模式 Coupling models of vegetation and soil
		$f(x)/g(y) < 0.8$	中度失调衰退类土壤损益型
	$0.3 < D \leq 0.4$	轻度失调衰退类	$f(x)/g(y) > 1.2$ 轻度失调衰退类植被损益型
		$0.8 \leq f(x)/g(y) \leq 1.2$	轻度失调衰退类植被土壤共损型
		$f(x)/g(y) < 0.8$	轻度失调衰退类土壤损益型
过渡发展类 Transitional development type	$0.4 < D \leq 0.5$	濒临失调衰退类	$f(x)/g(y) > 1.2$ 濒临失调衰退类植被损益型
		$0.8 \leq f(x)/g(y) \leq 1.2$	濒临失调衰退类植被土壤共损型
		$f(x)/g(y) < 0.8$	濒临失调衰退类土壤损益型
	$0.5 < D \leq 0.6$	勉强协调发展类	$f(x)/g(y) > 1.2$ 勉强协调发展类植被滞后型
		$0.8 \leq f(x)/g(y) \leq 1.2$	勉强协调发展类植被土壤同步型
		$f(x)/g(y) < 0.8$	勉强协调发展类土壤滞后型
协调发展类 Coordinated development type	$0.6 < D \leq 0.7$	初级协调发展类	$f(x)/g(y) > 1.2$ 初级协调发展类植被滞后型
		$0.8 \leq f(x)/g(y) \leq 1.2$	初级协调发展类植被土壤同步型
		$f(x)/g(y) < 0.8$	初级协调发展类土壤滞后型
	$0.7 < D \leq 0.8$	中级协调发展类	$f(x)/g(y) > 1.2$ 中级协调发展类植被滞后型
		$0.8 \leq f(x)/g(y) \leq 1.2$	中级协调发展类植被土壤同步型
		$f(x)/g(y) < 0.8$	中级协调发展类土壤滞后型
	$0.8 < D \leq 0.9$	良好协调发展类	$f(x)/g(y) > 1.2$ 良好协调发展类植被滞后型
		$0.8 \leq f(x)/g(y) \leq 1.2$	良好协调发展类植被土壤同步型
		$f(x)/g(y) < 0.8$	良好协调发展类土壤滞后型
	$0.9 < D \leq 1.0$	优质协调发展类	$f(x)/g(y) > 1.2$ 优质协调发展类植被滞后型
		$0.8 \leq f(x)/g(y) \leq 1.2$	优质协调发展类植被土壤同步型
		$f(x)/g(y) < 0.8$	优质协调发展类土壤滞后型

f(*x*): 植被综合评价函数, function of the vegetation comprehensive evaluation; *g*(*y*): 土壤综合评价函数, function of the soil comprehensive evaluation

2.2 中国南海北部岛屿植物与土壤系统的耦合协调性分析

为了更好地分析中国南海北部不同岛屿植被系统与土壤系统的综合指数变化情况,借助耦合和耦合协调度理论模型,利用公式计算得到植被综合指数 *f*(*x*)、土壤综合指数 *g*(*y*)、植被土壤系统耦合度 *C* 和耦合协调度 *D*(表 3),目的是为了更好评判植被生长、土壤环境交互耦合的协调程度^[21]。从中可以看出,5 个岛屿植被与土壤的综合指数在各个岛屿中的位置不完全一致,其中植被综合指数的顺序为甘蔗岛>大汉三墩岛>大庙墩岛>涠洲岛>蜈支洲岛,土壤综合指数的顺序为大汉三墩岛>涠洲岛>蜈支洲岛>大庙墩岛>甘蔗岛,甘蔗岛和大庙墩岛的植被效应好于土壤效应,其余 3 个岛的土壤综合指数均高于植被综合指数;5 个岛屿植被和土壤的耦合度和耦合协调度中偏高但不完全一致,耦合度的顺序依次为大庙墩岛、蜈支洲岛、大汉三墩岛、涠洲岛和甘蔗岛,耦合协调度模型顺序为大庙墩岛>蜈支洲岛>大汉三墩岛>甘蔗岛>涠洲岛,5 个岛屿植被土壤均处于初中级协调发展类;值得注意的是,甘蔗岛处于初级协调发展类植被滞后型,虽然甘蔗岛面积小、岩石裸露率高而土壤养分含量居中,植被发展欠佳,处于一种低能量水平的协调发展状态且植被滞后型,应提高植物多样性和植物生长抚育水平;大庙墩岛、蜈支洲岛、大汉三墩岛均属于中级协调发展类植被土壤同步型,减少人为干扰,顺其自然恢复即可;涠洲岛属于初级协调发展状态的植被土壤同步型,处于一种低能量水平的协调发展状态,应在增加植物多样性和提高生长抚育水平的同时,适当增施有机肥。

表 3 不同岛屿生态系统植被与土壤耦合协调状况评判结果

Table 3 Evaluation results of ecosystem coordination in the different islands

岛屿 Islands	植被综合 评价函数 Function of vegetation comprehensive evaluation $f(x)$	土壤综合 评价函数 Function of soil comprehensive evaluaton $g(y)$	$f(x)$ 与 $g(y)$ 的 对比关系 Comparison relationships with $f(x)$ and $g(y)$ $f(x)/g(y)$	植被土壤 系统耦合度 Coupling degree between vegetation and soil systems (C)	植被土壤系统 耦合协调度 Coupling coordinative degree between vegetation and soil systems (D)	耦合协调模型 Coupling coordinative models
大汉三墩岛 Dahansandun Island	0.7671	0.8809	0.8672	0.6262	0.7165	中级协调发展类植被 土壤同步型
大庙墩岛 Damiaodun Island	0.7012	0.6246	1.1693	0.8390	0.7438	中级协调发展类植被 土壤同步型
甘蔗岛 Ganzhe Island	1.0367	0.5574	1.9548	0.5887	0.6680	初级协调发展类植被 滞后型
涠洲岛 Weizhou Island	0.6825	0.8339	1.0441	0.6041	0.6566	初级协调发展类植被 土壤同步型
蜈支洲岛 Wuzhizhou Island	0.6238	0.7866	0.8707	0.8001	0.7292	中级协调发展类植被 土壤同步型

3 结论与讨论

生态文明建设是关系中华民族永续发展的千年大计和根本大计,中国南海作为我国重点的生态功能区和战略区之一^[18],其生态恢复和生态保护直接关系到国家的生态安全^[36]。本文基于 2 级层次 24 个植被土壤指标构建的中国南海北部代表性岛屿植被土壤的耦合度模型和耦合协调度模型不同,由于岛屿相对封闭,受人类干扰相对较少,总体上属于协调发展的状态,但均仅仅属于初中级协调发展,特别是甘蔗岛和涠洲岛,处于初级协调发展状态。与喀斯特峰丛洼地退耕还林还草工程植被土壤耦合协调状态不同^[28],这可能是退耕还林还草工程实施的时间比较短(仅仅 5 年),植被土壤耦合协调状态不理想,大部分模式处于失调衰退和过渡发展时期,仅有桂牧 1 号和撂荒模式处于植被土壤同步型,因此,在喀斯特峰丛洼地实施退耕还林还草工程时应同步提高植物生长抚育和土壤管理水平。按照孙黄平等^[32]、李琳等^[33]、黄冬梅等^[12]将城镇化与生态环境耦合协调关系划分为 6、7 个阶段,南海北部岛屿植被与土壤的耦合协调状态属于中度协调和良好协调类型($0.6 \leq D < 0.7$,中度协调, $0.7 \leq D < 0.8$,良好协调),与本研究结果相比,模糊了植被土壤耦合协调状态,从而影响制定相应的植被和土壤管理措施。

植物与土壤间的物质和能量的循环交换驱动着陆地生态系统的持续变化,因此研究植被-土壤间的耦合协调关系对评价陆地生态系统功能具有重要意义^[3],特别是对陆地生态系统现有状态的评估以及制定相应的管理措施均有重要的指导意义。岛屿因远离内陆,所受人类扰动相对较小,植被与土壤在长期的演替、互相反馈过程中,中国南海北部岛屿植被土壤耦合协调状态相对较好。大汉三墩岛、大庙墩岛和蜈支洲岛均属于中级协调发展阶段植被土壤同步型,涠洲岛为初级协调发展类植被土壤同步型,甘蔗岛为初级协调发展类植被滞后型,这与岛屿植被土壤的实际情况一致;大汉三墩岛、大庙墩岛和蜈支洲岛属于中级协调发展状态的植被土壤同步型,保持减少人为干扰、顺其自然恢复即可;甘蔗岛由于岛屿面积小,岩石裸露率高,土壤养分含量相对较高,而由于种质资源受限,植被发展滞后于土壤,后期需要引入植物多样性,提高植被抚育水平;涠洲岛是其中面积最大的岛屿,人类干扰较多,处于能量水平较低的植被土壤同步型,在增加物种多样性和提高植物抚育水平的同时,加强土壤管理;随着时间的延伸,各岛屿生态系统的耦合协调将逐步加强。不同岛屿生态系统的植被土壤耦合协调性的研究将为中国南海乃至全国沿海区域尺度范围内岛屿的生态服务功能、生态经济耦合度和耦合协调度模型的构建奠定基础,为促进该区生态经济的健康发展提供科学依据。

参考文献 (References):

[1] Wardle D A, Bardgett R D, Klironomos J N, Setälä H, Van Der Putten W H, Wall D H. Ecological linkages between aboveground and
<http://www.ecologica.cn>

- belowground biota. *Science*, 2004, 304(5677): 1629-1633.
- [2] Jenny H. *Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology*. New York: McGraw-Hill, 1941.
- [3] Berner L T, Law B E. Plant traits, productivity, biomass and soil properties from forest sites in the Pacific Northwest, 1999-2014. *Scientific Data*, 2016, 3(1): 160002.
- [4] Saifullah, Dahlawi S, Naeem A, Rengel Z, Naidu R. Biochar application for the remediation of salt-affected soils: challenges and opportunities. *Science of the Total Environment*, 2018, 625: 320-335.
- [5] Crawford K M, Bauer J T, Comita L S, Eppinga M B, Johnson D J, Mangan S A, Queenborough S A, Strand A E, Suding K N, Umbanhowar J, Bever J D. When and where plant-soil feedback may promote plant coexistence: a meta-analysis. *Ecology Letters*, 2019, 22(8): 1274-1284.
- [6] Schittko C, Runge C, Strupp M, Wolff S, Wurst S. No evidence that plant-soil feedback effects of native and invasive plant species under glasshouse conditions are reflected in the field. *Journal of Ecology*, 2016, 104(5): 1243-1249.
- [7] Oldfield E E, Wood S A, Bradford M A. Direct effects of soil organic matter on productivity mirror those observed with organic amendments. *Plant and Soil*, 2018, 423(1/2): 363-373.
- [8] Lau L S, Choong C K, Eng Y K. Investigation of the environmental Kuznets curve for carbon emissions in Malaysia: do foreign direct investment and trade matter? *Energy Policy*, 2014, 68: 490-497.
- [9] Saboori B, Sulaiman J. Environmental degradation, economic growth and energy consumption: evidence of the environmental Kuznets curve in Malaysia. *Energy Policy*, 2013, 60: 892-905.
- [10] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-Being: Biodiversity Synthesis*. Washington: World Resources Institute, 2005.
- [11] 谷祎璠, 丁疆辉, 李奥梦. 保定市生产性生态承载力与生态功能耦合协调度时空分异. *生态学报*, 2020, 40(20): 7175-7186.
- [12] 黄冬梅, 刘小玉, 郑庆昌, 刘骏. 多中心格局对城镇化与生态环境耦合协调发展的影响研究——以福建省两大都市区为例. *生态学报*, 2020, 40(21): 7886-7896.
- [13] 刘春雨, 刘英英, 丁晓干. 福建省新型城镇化与生态环境的耦合分析. *应用生态学报*, 2018, 29(9): 3043-3050.
- [14] 马亚亚, 刘国彬, 张超, 王杰. 陕北安塞县生态与经济系统耦合协调发展. *生态学报*, 2019, 39(18): 6840-6849.
- [15] 李响, 齐文平, 谭畅, 王白雪, 王艳慧. 生态环境脆弱性与多维贫困的耦合关系——基于广西河池市 1586 个贫困村的实证分析. *应用生态学报*, 2019, 30(12): 4303-4312.
- [16] 曹诗颂, 王艳慧, 段福洲, 赵文吉, 王志恒, 房娜. 中国贫困地区生态环境脆弱性与经济贫困的耦合关系——基于连片特困区 714 个贫困县的实证分析. *应用生态学报*, 2016, 27(8): 2614-2622.
- [17] Su J L. Overview of the South China Sea circulation and its influence on the coastal physical oceanography outside the Pearl River Estuary. *Continental Shelf Research*, 2004, 24(16): 1745-1760.
- [18] 任海, 简曙光, 张倩娟, 王发国, 沈彤, 王俊. 中国南海诸岛的植物和植被现状. *生态环境学报*, 2017, 26(10): 1639-1648.
- [19] 刘喆. 南海问题的新形势与挑战——2020 年度“南海论坛”综述. *亚太安全与海洋研究*, 2021, (1): 62-71, 3-3.
- [20] 廖彬彬, 蔡永立, 谢长坤, 郝蕙玲. 南海永兴岛珊瑚岛礁生境格局动态研究. *海洋环境科学*, 2013, 32(5): 746-751.
- [21] 游长江, 侯佩旭, 邓灿芳, 马科, 李欣达, 邹明亮, 梅振炜, 王景清. 西沙群岛旅游资源调查与评价. *资源科学*, 2015, 37(8): 1609-1620.
- [22] 程浚洋. 中国东部海岛植物群落类型与功能多样性[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- [23] 张芳, 杜虎, 曾馥平, 彭晚霞, 宋同清. 西南喀斯特峰丛洼地木本植物群落结构与多样性变化. *生态学报*, 2020, 40(12): 4094-4104.
- [24] Cornelissen J H C, Lavorel S, Garnier E, Díaz S, Buchmann N, Gurvich D E, Reich P B, Ter Steege H, Morgan H D, Van Der Heijden M G A, Pausas J G, Poorter H. A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 2003, 51(4): 335-380.
- [25] 鲍士旦. *土壤农化分析*(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [26] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 肖和艾. *土壤微生物生物量测定方法及其应用*. 北京: 气象出版社, 2006.
- [27] 纪学朋, 白永平, 杜海波, 王军邦, 周亮. 甘肃省生态承载力空间定量评价及耦合协调性. *生态学报*, 2017, 37(17): 5861-5870.
- [28] 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 王克林, 杜虎, 鹿士杨. 喀斯特峰丛洼地退耕还林还草工程的植被土壤耦合协调度模型. *农业工程学报*, 2011, 27(9): 305-310.
- [29] 原琳娜, 李富佳, 董锁成, 刘鑫, 马蓓蓓. 西安市生态环境与经济耦合关系. *地域研究与开发*, 2016, 35(3): 128-132.
- [30] Illingworth V. *The Penguin Dictionary of Physics*. Beijing: Foreign Language Press, 1996: 92-93.
- [31] 李慧杰, 牛香, 王兵, 赵志江. 生态系统服务功能与景观格局耦合协调度研究——以武陵山区退耕还林工程为例. *生态学报*, 2020, 40(13): 4316-4326.
- [32] 孙黄平, 黄震方, 徐冬冬, 施雪莹, 刘欢, 谭林胶, 葛军莲. 泛长三角城市群城镇化与生态环境耦合的空间特征与驱动机制. *经济地理*, 2017, 37(2): 163-170, 186-186.
- [33] 李琳, 卢佳佳. 中国省域城镇化的资源环境承载力响应及影响因素. *经济经纬*, 2018, 35(3): 8-15.
- [34] 方传棣. *长江经济带矿产资源开发-经济-环境耦合协调发展研究*[D]. 武汉: 中国地质大学, 2019.
- [35] 冯宗炜, 王效科, 吴刚. *中国森林生态系统的生物量和生产力*. 北京: 科学出版社, 1999.
- [36] 任海, 李萍, 彭少麟. *海岛与海岸带生态系统恢复与生态系统管理*. 北京: 科学出版社, 2004.