

青海省生态系统碳储量、碳汇量预测及碳中和潜力评估^{*}

韩良煜¹ 周群星¹ 李宏波² 魏永瑜² 穆卫锋³ 张懿嘉^{4#}

(1.国网青海省电力公司,青海 西宁 810008;2.国网青海省电力公司信息通信公司,青海 西宁 810000;
 3.浙江大学深圳研究院,广东 深圳 518057;4.浙江大学环境与资源学院,浙江 杭州 310058)

摘要 增加生态系统碳汇量是应对全球气候变化,助力碳中和的重要途径。不同土地利用类型之间的相互转化导致生态系统碳储量发生改变,因此控制土地利用类型转变可为实现区域碳中和目标提供新的方法。丰富的自然资源和非化石能源使得青海省具有率先实现碳达峰、碳中和的巨大潜力。利用 CA-Markov 模型主要模拟了生态保护、低碳发展两种情景下,2025、2030 年青海省土地利用类型变化引起的生态系统碳储量及碳汇量演变趋势,并结合 GAINS 模型模拟得到的青海省碳排放量,评估碳中和潜力。结果发现,低碳发展情景比生态保护情景能获得更可观的生态系统碳储量增长,2025 年青海省依靠控制土地利用类型转变产生的生态系统碳汇量基本能够实现自身碳中和,2030 年也能达到近 50% 的碳中和,借助其他途径也有望实现碳中和目标。

关键词 碳汇量 碳储量 土地利用类型 碳中和 气候变化

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2023.12.015

Carbon storage and carbon sink prediction of ecosystem and carbon neutrality potential assessment for Qinghai Province
 HAN Liangyu¹, ZHOU Qunxing¹, LI Hongbo², WEI Yongyu², MU Weifeng³, ZHANG Yijia⁴. (1. State Grid Qinghai Electric Power Company, Xining Qinghai 810008; 2. Information Communication Company of State Grid Qinghai Electric Power Company, Xining Qinghai 810000; 3. Shenzhen Research Institute, Zhejiang University, Shenzhen Guangdong 518057; 4. College of Environmental & Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310058)

Abstract: Increasing ecosystem carbon sink is an effective way on global climate change and carbon neutrality. Due to the mutual transformation between different land use types, the ecosystem carbon storage changes. Therefore, controlling the transformation between different land use types provides a new method for achieving regional carbon neutrality goal. Relying on vast natural resources and abundant non-fossil energies, Qinghai Province has the great potential to take the lead in achieving carbon peaking and carbon neutrality. CA-Markov Model was used to mainly simulate the possible evolution trend of carbon storage and sink of land use types change in Qinghai Province in 2025 and 2030 under 2 scenarios of ecological protection and low-carbon development. The carbon neutrality potential assessment was carried out after carbon emission simulated by the GAINS Model. Results showed that low-carbon development scenario gained vaster carbon storage increase than ecological protection scenario. In general, Qinghai Province could achieve its own carbon neutrality by 2025 relying on the ecosystem carbon sink generated by controlling the transformation between different land use types. About 50% of carbon neutrality might still achieve by 2030, and it was probable to achieve full carbon neutrality with other associated ways.

Keywords: carbon sink; carbon storage; land use types; carbon neutrality; climate change

人类活动对生态系统的改造,使得土地利用类型发生变化,由此导致原有生态系统的碳储量变化,进而引起生态系统的碳汇量改变。
 CA-Markov 模型是生态系统土地利用类型变化的预测模型。近年,许多研究者将 CA-Markov 模型与碳排放计量模型结合,来探究区域内土地利用类型转化引起的碳储量和碳汇量变化。杨洁等^[1]、

史明杰等^[2]、刘洋等^[3]、WANG 等^[4]结合 Invest 模型分别对黄河流域、伊犁谷地、疏勒河流域、甘肃省的碳储量时空变化进行了预测。利用克里金插值方法^[5]和遥感方法^[6-7]可以对结果进行更好地展示。结合 GAINS 模型则可得到土地利用类型变化引起的碳排放量,实现陆地生态系统碳中和的潜力评估。GAINS 模型由 RAINS 模型发展而来,可以同时模

第一作者:韩良煜,男,1977 年生,本科,高级工程师,研究方向为电力碳中和。[#] 通讯作者。
^{*} 青海省碳中和潜力大数据评估科研项目(No.K 横 20220458)。

拟常规空气污染物(SO_2 、氮氧化物、挥发性有机物、颗粒物、 NH_3)和主要温室气体(CO_2 、 CH_4 、 N_2O 、氢氟碳化物、全氟碳化物、 SF_6)^[8]。

青海省地处我国西北内陆地区,地形复杂多样,是长江、黄河、澜沧江的发源地,拥有大面积的天然草地、林地以及湿地,碳汇资源丰富,具有实现“双碳”目标的优越基础条件。GAO等^[9]的研究结果表明,在“十三五”期间,青海省生态系统的碳储量增加了0.091 Pg(本研究的碳无特殊说明均以碳元素计),主要得益于草原大幅扩张,由此可见生态系统碳汇在抵消人为碳排放方面的潜力,特别是在资源丰富且生态系统恢复和管理良好的青海省地区,通过改变土地利用类型增加碳汇以实现碳中和具有一定的可行性。因此,本研究首先运用CA-Markov模型分别对2025、2030年青海省土地利用类型变化空间格局进行预测,结合不同土地利用类型的碳密度数据,对青海省2025、2030年的生态系统碳储量进行预测,并将相对于2020年的碳储量变化量作为青海省未来的生态系统碳汇量,最后根据GAINS模型预测的青海省碳排放量评估青海省生态系统碳汇量的碳中和潜力。

1 方法与数据

1.1 CA-Markov 模型

本研究利用IDRISI软件进行CA-Markov模型模拟。模拟以青海省2013、2018年的土地利用类型转变矩阵为未来演变的转移概率矩阵,以2020年为基准年,逐步进行2025、2030年的土地利用类型变化预测。主要考虑了以下3种情景:

(1) 依据自然发展趋势的自然演化情景。自然演化情景是指在不受人为约束的条件下,土地利用类型按照其原有的变化趋势演化。假设到2025、2030年,影响土地利用类型转变的因素没有发生变化,根据历史转移概率预测未来土地利用类型分布。

(2) 加强减速演化管理的生态保护情景。生态保护情景在自然演化情景基础上增加了一些减速演化的人为约束,具体包括:①农田不能转出;②林地和草地只能内部转化,不能转出;③湿地(包括河渠及水库坑塘、湖泊、永久性冰川、滩涂滩地和沼泽)不能转出与转入;④建设用地不能转出;⑤永久性冰川只能由未利用地转入。同时,利用IDRISI软件内设的“J”型变化模型计算农田、林地、草地和建设用地的的发展适宜程度将生态系统和人类社会的发展规律考虑进去。

(3) 强化碳汇的可持续的低碳发展情景。低碳发展情景在保留生态保护情景中的限制条件外,增加每类土地利用类型不能向比自身碳密度低的地利用类型转化的限制条件,并假设未来南部三江源区(果洛、海南和黄南)草地储碳能力也将发展到海北和海东的林草业发展示范基地水平。

1.2 GAINS 模型

本研究使用适合中国的GAINS在线模型中的Asia子模块,模拟了联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)的第六次评估报告(AR6)背景下能源 CO_2 排放情景,对2025、2030年青海省碳排放量(以 CO_2 计)进行预测。

1.3 数据来源

青海省土地利用和土地覆被数据来源于中科院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)的全国土地利用类型遥感监测空间分布数据。本研究针对青海省的具体情况对土地利用类型进行了重新分类,考虑到不同土地利用类型之间的相似性和碳密度差异性,并且便于为不同土地利用类型之间相互转化设置限制条件,除农田、林地、草地以及建设用地外,将水域拆分为河渠及水库坑塘、湖泊、永久性冰川、滩涂滩地,将未利用地拆分为沙地、沼泽、其他未利用地。最终青海省土地利用类型分成了11个类型。道路、水路数据来自于地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn>)。对青海省各类土地利用类型的地上、地下、土壤以及沉积物四大碳库的碳密度进行了收集整理,如果相关数据缺失时用就近的数据代替,结果如表1所示,一般认为,永久性冰川和其他未利用地的碳密度为零,因此表1中未列出。

2 结果分析与讨论

2.1 青海省生态系统碳储量预测

3种情景下2025、2030年各土地利用类型面积变化情况如表2所示。自然演化情景由于未加任何限制条件,各土地利用类型的面积均有较为剧烈的变化。青海省具有丰富的生态资源和重要的生态区位优势,“十三五”期间通过实施各种生态产业发展举措,全省林草产业发展态势良好,未来也将继续坚持贯彻生态保护优先、推动高质量发展、创造高品质生活的“一优两高”方案,因此自然演化情景不能真实反映未来的变化趋势,下面不再考虑此情景。生态保护情景和低碳发展情景下,农田、林地和草地的面积均有所增长,但湿地面积在两种情景下增减不

表 1 青海省各区域不同土地利用类型碳密度数据¹⁾

土地利用类型	格尔木	果洛	海北	海东	海南	海西	黄南	西宁	玉树	文献
农田	115.10	115.10	115.10	115.10	115.10	115.10	115.10	115.10	115.10	[10]
林地	161.16	161.16	161.16	161.16	161.16	161.16	161.16	161.16	161.16	[11]
草地	25.70	66.20	80.50	80.50	75.30	9.21	75.30	80.50	25.70	[3],[12]
河渠及水库坑塘	31.35	31.35	31.35	31.35	31.35	31.35	31.35	31.35	31.35	[13]
湖泊	28.94	28.94	28.94	28.94	28.94	28.94	28.94	28.94	28.94	[13]
滩涂滩地	131.25	131.25	131.25	131.25	131.25	131.25	131.25	131.25	131.25	[14]
建设用地	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	[3]
沙地	12.45	12.45	12.45	12.45	12.45	12.45	12.45	12.45	12.45	[15],[16]
沼泽	131.25	131.25	131.25	131.25	131.25	131.25	131.25	131.25	131.25	[14]

注：¹⁾考虑到青海省区域间草地碳密度差异较大,因此将属于海西的格尔木单列,海西中的数据不再包括格尔木的数据。

表 2 不同情景下青海省各土地利用类型预测面积变化量

土地利用类型	自然演化情景		生态保护情景		低碳发展情景	
	2025 年	2030 年	2025 年	2030 年	2025 年	2030 年
农田	1 803	3 663	327	641	140	386
林地	7 693	15 389	46	90	194	387
草地	−14 870	−29 949	379	774	397	795
河渠及水库坑塘	2 121	4 241	656	1 299	489	970
湖泊	−884	−1 784	313	633	−627	−1 263
永久性冰川	80	259	3	3	3	3
滩涂滩地	3 641	7 281	−963	−1 928	148	296
建设用地	302	610	44	61	1 423	1 420
沙地	944	1 888	−28	−60	−148	−113
沼泽	3 141	6 296	1 727	3 356	1 765	3 587
其他未利用地	−3 971	−7 894	−2 504	−4 869	−3 784	−6 468

一。在低碳发展情景下,湖泊面积减少,而滩涂滩地面积增加;生态保护情景下以上两类土地利用类型的变化正好相反。原因在于滩涂滩地的储碳能力远大于湖泊,因此在低碳发展情景下湿地面积倾向于向碳密度更大的滩涂滩地转化。

青海省各地 2025、2030 年的生态系统碳储量预测结果如图 1 所示。生态保护情景和低碳发展情景

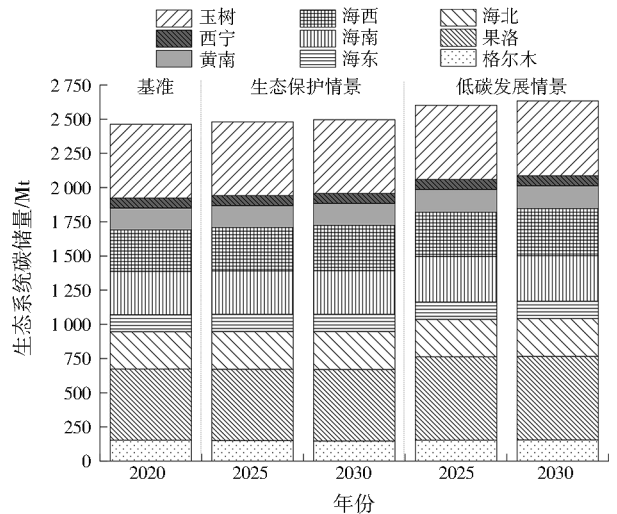


图 1 青海省生态系统碳储量预测结果
 Fig.1 Predicted carbon storage of ecosystem for Qinghai Province

下,从 2020 年到 2025、2030 年,青海省生态系统碳储量都呈增长趋势。生态保护情景下,2025、2030 年青海省生态系统碳储量分别相对于 2020 年增加了 0.74%、1.40%;低碳发展情景下,2025、2030 年青海省生态系统碳储量分别相对于 2020 年增加了 5.65%、6.94%。可见,低碳发展情景下碳储量增长幅度更大。各地的生态系统碳储量基本上能够保持稳定或有所上升趋势。但格尔木在生态保护情景下 2025 年碳储量有略微降低,主要是由于滩涂滩地和其他未利用地的面积都下降,而农田、草地、湖泊、沼泽的面积都增加。

2.2 青海省生态系统碳汇量预测

表 3 展示了青海省不同土地利用类型在两种情景下的碳汇量。在生态保护情景下,滩涂滩地碳汇量负值,表现为碳源作用;其他土地利用类型均表现为碳汇作用。在低碳发展情景下,湖泊和沙地也表现出轻微的碳源作用,其他土地利用类型表现为碳汇作用。

表 4 计算了各土地利用类型对生态系统碳汇量的贡献率。对比发现,生态保护情景下碳汇量主要来源于沼泽,贡献率超过 70%,此外,农田的贡献率

表 3 青海省各土地利用类型碳汇量
Table 3 Carbon sink of different land use types in Qinghai Province

土地利用类型	生态保护情景		低碳发展情景	
	2020—2025 年	2020—2030 年	2020—2025 年	2020—2030 年
农田	3.75	7.34	1.60	4.42
林地	0.73	1.45	3.13	6.24
草地	1.47	2.84	111.07	112.41
河渠及水库坑塘	1.73	3.76	1.19	2.72
湖泊	1.19	2.11	−1.53	−3.37
永久性冰川	0	0	0	0
滩涂滩地	−12.65	−25.28	1.94	3.89
建设用地	0	0	0.16	0.16
沙地	0.02	0.02	−0.19	−0.19
沼泽	22.03	42.32	21.66	44.73
其他未利用地	0	0	0	0

表 4 青海省各土地利用类型碳汇量贡献率¹⁾
Table 4 Carbon sink contribution rates of different land use types in Qinghai Province

土地利用类型	生态保护情景		低碳发展情景	
	2020—2025 年	2020—2030 年	2020—2025 年	2020—2030 年
农田	12.13	12.27	1.14	2.53
林地	2.35	2.42	2.22	3.57
草地	4.77	4.74	78.92	64.39
河渠及水库坑塘	5.60	6.28	0.84	1.56
湖泊	3.86	3.52	—	—
滩涂滩地	—	—	1.38	2.23
建设用地	0	0	0.11	0.09
沙地	0.07	0.03	—	—
沼泽	71.23	70.74	15.39	25.63

注：¹⁾—表示实际为碳源作用,对碳汇没有贡献。表 5 同。

表 5 青海省各区域碳汇量贡献率
Table 5 Carbon sink contribution rates of different regions in Qinghai Province

区域	生态保护情景		低碳发展情景	
	2020—2025 年	2020—2030 年	2020—2025 年	2020—2030 年
格尔木	—	—	0.86	1.63
果洛	3.30	3.28	63.23	51.87
海北	15.76	14.85	2.42	3.70
海东	0.49	0.37	0.02	0.08
海南	3.89	3.75	11.45	10.00
海西	74.09	73.84	14.88	23.92
黄南	1.77	1.91	5.15	4.38
西宁	0.04	0.62	0.01	0.18
玉树	0.66	1.38	1.98	4.24

也超过 10%；低碳发展情景下碳汇量主要来源于草地,贡献率在 70%左右,沼泽也贡献了 15.39%~25.63%,两者合计贡献达到约 90%。两种情景对比可知,低碳发展情景的碳汇总量大于生态保护情景,这主要得益于草地和滩涂滩地碳汇量增加,其中滩涂滩地由生态保护情景的碳源作用转变为低碳发展情景的碳汇作用,因此加强草地和滩涂滩地保护非常重要。

表 5 计算了青海省各区域的碳汇量贡献率。生

态保护情景下海西是最主要的碳汇贡献者；低碳发展情景下果洛为最主要的碳汇贡献者。海西拥有广阔的土地面积且多为沙地等未利用地,加上海拔高等自然地理条件限制,人类活动相对较少,有巨大的碳汇潜力。果洛地处三江源区,拥有丰富的植被资源,也有巨大的碳汇潜力。

2.3 青海省生态系统碳中和潜力评估

由表 6 可见,2025、2030 年青海省的碳排放量分别为 49.30、50.40 Mt。将 2020—2025、2025—

表 6 青海省 2025、2030 年碳中和潜力预测
 Table 6 Prediction of the carbon neutrality potential of Qinghai Province in 2025 and 2030

指标	生态保护情景		低碳发展情景	
	2025 年	2030 年	2025 年	2030 年
年均碳汇量/Mt	13.40	11.94	101.95	23.45
碳排放量/Mt	49.30	50.40	49.30	50.40
碳中和潜力/%	27.18	23.68	206.80	46.53
碳排放盈余量/Mt	35.90	38.46	-52.65	26.95

表 7 青海省各区域碳排放量和碳中和潜力
 Table 7 Carbon emission and carbon neutrality potential of different regions in Qinghai Province

区域	贡献度/%	碳排放量		碳中和潜力/%			
		2025 年排放量/Mt	2030 年排放量/Mt	2025 年生态保护情景	2030 年生态保护情景	2025 年低碳发展情景	2030 年低碳发展情景
果洛	3	1.48	1.51	33.33	30.48	4 358.79	38.68
海北	4	1.97	2.02	119.53	97.27	125.02	107.59
海东	12	5.92	6.05	1.24	0.57	0.40	1.28
海南	8	3.94	4.03	14.75	12.60	295.96	21.38
海西	23	11.34	11.59	83.99	70.80	141.51	137.99
黄南	4	1.97	2.02	13.41	14.42	266.39	12.11
西宁	44	21.69	22.18	0.03	0.78	0.04	0.95
玉树	2	0.99	1.01	10.05	29.86	204.46	328.05

2030 年的碳汇量除以 5 并换算成以 CO₂ 计得到年均碳汇量,将碳汇量占碳排放量的百分比作为碳中和潜力评价指标。结果发现,生态保护情景下,2025、2030 年的碳汇量分别可中和 27.18%、23.68%的碳排放量,此时仍有 35.90、38.46 Mt 剩余而未能被中和;低碳发展情景下,2025 年碳汇量能够完全中和碳排放量,而 2030 年的碳中和潜力也有 46.53%。由此可见,低碳发展情景相比生态保护情景优势更加明显。

为探究青海省各区域的碳中和潜力,本研究根据国网青海省电力公司发布的《基于电力高频数据碳排放监测分析报告》中 2021 年第一季度青海省各区域碳排放量贡献率计算 2025、2030 年各区域碳排放量,结果如表 7 所示。因该报告中格尔木没有单独的数据,因此将格尔木合并在海西中计算。

生态保护情景下,仅有海北能够依靠自身生态系统碳汇基本实现碳中和,此外,海西碳汇可以中和 70%以上的碳排放量,其他区域的碳中和潜力都较低。低碳发展情景下,除海东和西宁外,其余 6 个区域 2025 年都能实现自身碳中和,海东和西宁主要是因为人口和产业过于集聚;2030 年也有海北、海西、玉树仍然能实现自身碳中和。由此来看,低碳发展情景下,2025 年青海省基本上能够实现碳汇量和碳排放量的“自给自足”,同时尚有碳排放余量可供

未达标区域使用,因此青海省可形成一种兼顾社会经济发展和生态环境保护的碳中和新模式。

3 结论与建议

3.1 结 论

(1) 低碳发展情景比生态保护情景能获得更可观的生态系统碳储量增长,到 2025、2030 年青海省生态系统碳储量分别能够较 2020 年增加 5.65%、6.94%。

(2) 生态保护情景下,沼泽是碳汇量的主要贡献者,贡献率超过 70%。低碳发展情景下,草地是碳汇量的主要贡献者,贡献率也在 70%左右。低碳发展情景下的碳汇总量更大,主要得益于草地和滩涂滩地碳汇量增加。从区域角度看,生态保护情景下海西是最主要的碳汇贡献者;低碳发展情景下果洛为最主要的碳汇贡献者。

(3) 青海省的土地利用类型按生态保护情景进行演变,仅有海北能够依靠自身生态系统碳汇基本实现碳中和,全省较难实现生态系统碳汇量与碳排放量的碳中和;按低碳发展情景进行演变,除海东和西宁外,2025 年都能实现自身碳中和,2030 年全省也能达到近 50%的碳中和。

3.2 建 议

实现区域碳中和可以从减少排放和增加碳汇两

个方面入手。从减少碳排方面看,青海省凭借丰厚的可再生能源和生态资源有望实现碳中和,未来青海省可充分发挥清洁能源优势,积极发展绿色电力产业;从增加碳汇方面看,除了控制不同土地利用类型转化实现生态系统碳储量增加以外,还可积极探索其他多种方式实现碳汇总量增长,例如可以实施 REDD+ 机制,建设城市绿地,等等。

参考文献:

[1] 杨洁,谢保鹏,张德罡.基于 InVEST 和 CA-Markov 模型的黄河流域碳储量时空变化研究[J].中国生态农业学报(中英文), 2021,29(6):1018-1029.

[2] 史名杰,武红旗,贾宏涛,等.基于 MCE-CA-Markov 和 InVEST 模型的伊犁谷地碳储量时空演变及预测[J].农业资源与环境学报, 2021,38(6):1010-1019.

[3] 刘洋,张军,周冬梅,等.基于 InVEST 模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究[J].生态学报, 2021,41(10):4052-4065.

[4] WANG L G, ZHU R, YIN Z L, et al. Impacts of land-use change on the spatio-temporal patterns of terrestrial ecosystem carbon storage in the Gansu Province, Northwest China[J]. Remote Sensing, 2022,14(13):3164.

[5] XIA L, ZENG Y N, LONG S M. Estimating changes in carbon stocks of forest vegetation in Hunan Province using the Cellular Automata-Markov Model [J]. Journal of Tropical Forest Science, 2018,30(2):269-277.

[6] KUNDU K, HALDER P, MANDAL J K. Detection and prediction of Sundarban reserve forest using the CA-Markov Chain Model and remote sensing data[J]. Earth Science Informatics, 2021,14(3):1503-1520.

[7] ETEMADI H, SMOAK J M, KARAMI J. Land use change assessment in coastal mangrove forests of Iran utilizing satellite imagery and CA-Markov algorithms to monitor and predict future change[J]. Environmental Earth Sciences, 2018,77(5):1-13.

[8] AMANN M, BERTOK I, BORKEN KLEEFELD J, et al. GAINS-Asia: a tool to combat air pollution and climate change simultaneously (methodology) [R]. Laxenburg: IIASA, 2008.

[9] GAO Y, ZHANG Y J, ZHOU Q X, et al. Potential of ecosystem carbon sinks to “neutralize” carbon emissions: a case study of Qinghai in west China and a tale of two stages [J]. Global Transitions, 2022,4:1-10.

[10] LI J Y, GONG J, GULDMANN J M, et al. Carbon dynamics in the Northeastern Qinghai-Tibetan Plateau from 1990 to 2030 using landsat land use/cover change data [J]. Remote Sensing, 2020,12(3):528.

[11] 王万同,唐旭利,黄玫,等.中国森林生态系统碳储量——动态及机制[M].北京:龙门书局,2018.

[12] 徐丽,何念鹏,于贵瑞.2010s 中国陆地生态系统碳密度数据集[J].中国科学数据库, 2019,4(1):86-92.

[13] 孔东升,张灏.张掖黑河湿地国家级自然保护区固碳价值评估[J].湿地科学, 2014,12(1):29-34.

[14] LI N, WANG G X, YANG Y, et al. Plant production, and carbon and nitrogen source pools, are strongly intensified by experimental warming in alpine ecosystems in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011,43(5):942-953.

[15] 梁楠,段星星,赵禹,等.西北地区典型生态系统表层土壤有机碳密度特征及其影响因素[J].地质论评, 2020,66(增刊 1):39-40.

[16] 赵忠贺,徐增让,成升魁,等.西藏生态系统碳蓄积动态的土地利用/覆被变化归因分析[J].自然资源学报, 2016,36(1):755-766.

编辑:陈锡超 (收稿日期:2022-09-07)

(上接第 1703 页)

[18] 吕淑果,唐丹玲,关学彬,等.海南岛近岸海域赤潮易发程度识别及重点监控区域划定[J].海洋环境科学, 2016,35(4).

[19] TSUCHIYA K, EHAMA M, YASUNAGA Y, et al. Seasonal and spatial variation of nutrients in the coastal waters of the northern Goto Islands, Japan [J]. Bulletin on Coastal Oceanography, 2018,55(2):125-138.

[20] 杨宇峰,王庆,聂湘平,等.海水养殖发展与渔业环境管理研究进展[J].暨南大学学报(自然科学与医学版), 2012,33(5):531-541.

[21] 吴钟解,张光星,陈石泉,等.海南西瑁洲岛周边海域造礁石珊瑚空间分布及其生态系统健康评价[J].应用海洋学学报, 2015,34(1):133-140.

[22] MARINI M, GRILLI F, GUARNIERI A, et al. Is the south-eastern Adriatic Sea coastal strip an eutrophic area? [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2010,88(3):395-406.

[23] FISHER T R, PEELE E R, AMMERMAN J W, et al. Nutrient limitation of phytoplankton in Chesapeake Bay [J]. Marine Ecology Progress Series, 1992,82(1):51-63.

[24] JUSTIC D, RABALAIS N N, TURNER R E, et al. Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: stoichiometric nutrient balance and its consequences [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1995,40(3):339-356.

编辑:陈锡超 (收稿日期:2022-10-25)