

岷江流域三江汇流区生态系统服务功能变化

武克军^{1,2,3}, 王娟¹, 吴成静¹

(1. 乐山师范学院旅游学院, 四川乐山 614000; 2. 四川旅游发展研究中心, 四川乐山 614000; 3. 四川旅游生态环境修复工程中心, 四川乐山 614000)

摘要 [目的] 分析岷江流域三江汇流区土地利用与生态服务功能的变化。[方法] 以乐山市中区为例, 对乐山市中区 2005—2014 年土地利用变化与生态系统服务功能变化进行评价。[结果] 林地面积年均增加量最多 (769.20 hm²), 而园地面积减少最多 (-488.90 hm²)。生态系统服务价值缓慢增加, 10 年平均增加 875.99 万元, 主要归因于林地的年均增加值 (2 007.68 万元)。调节服务功能年均增加最多 (398.53 万元), 而文化服务年均增加速度最快 (1.75%)。气体调节功能的年均增加量最多 (173.28 万元), 而文化娱乐功能的年均增加率最迅速 (1.75%)。[结论] 在今后的岷江流域三江汇流区的土地调控中, 继续增加林地面积和保护耕地, 为增加生态系统服务功能奠定良好的生态基础。

关键词 土地利用变化; 生态系统服务功能; 岷江流域三江汇流区; 乐山市中区
中图分类号 S181 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2018)26-0073-04

Changes of Ecosystem Service Function in Sanjiang Confluence Area of Minjiang River Basin

WU Ke-jun^{1,2,3}, WANG Juan¹, WU Cheng-jing¹ (1. College of Tourism, Leshan Normal University, Leshan, Sichuan 614000; 2. Tourism Development Research Center of Sichuan, Leshan, Sichuan 614000; 3. Tourism Ecological Environment Restoration Engineering Center of Sichuan, Leshan, Sichuan 614000)

Abstract [Objective] The research aimed to analyze the changes of land use and ecological service functions in Sanjiang Confluence Area of Minjiang River Basin. [Method] Taking the central district of Leshan City as an example, the change of land use and ecosystem service function in the central district of Leshan City from 2005 to 2014 were evaluated. [Result] The annual increase of forest area was the largest (769.20 hm²), while the decrease of garden area was the largest (-488.90 hm²). The ecosystem services value had slowly increased, with an average increase of RMB 8.759 9 million yuan in 10 years, mainly due to the annual increase of forest land value (RMB 20.076 8 million yuan). The annual growth rate of mediation services was the highest (RMB 3.985 3 million yuan), while the annual growth rate of cultural services was the fastest (1.75%). The annual increase of gas regulation function was the highest (1.732 8 million yuan), while the annual increase rate of cultural and entertainment function was the fastest (1.75%). [Conclusion] In the future land regulation and control of the Sanjiang Confluence Area in the Lancang River Basin, the forest area will be increased and the cultivated land will be protected, which will lay a good ecological foundation for increasing the service function of the ecosystem.

Key words Land-use change; Ecosystem service function; Sanjiang confluence area of Minjiang River Basin; Central district of Leshan City

生态系统服务价值(Ecosystem Services Value, ESV)作为联系自然和人文过程的桥梁, 已经成为生态学和地理学的研究热点^[1]。生态系统服务价值是指直接或间接促进人类福祉的生态特征、功能和过程, 主要包括供给服务、支持服务、调解服务和文化服务^[2-4]。人类的土地利用活动改变了土地覆盖状况, 影响生态系统格局与过程, 从而改变生态系统服务功能^[1,4-5]。因此, 在人类活动频繁地区, 人类干扰强烈, 从而使得生态系统服务功能受到严重威胁^[6]。

长江流域是世界上人口最多的巨型流域, 地形地貌复杂多变, 人类活动干扰强烈, 是我国生态安全战略格局的重要组成部分^[7]。因此, 长江流域的生态系统服务功能对我国生态平衡具有重要的影响^[8]。随着人类各种活动的加剧, 使得生态环境退化等问题凸显^[9]。国内众多学者关注了长江流域的生态系统服务功能^[8-10], 众多研究主要关注流域或城市的生态系统服务变化, 比如长三角城市化地区^[11-12]、太湖流域^[13]、长江中上游城市^[14-15]、汉江上游^[16]和岷江流域城市^[17-18]等。这些研究成果极大地促进了人们对长江流域生态系统服务的认知, 为长江流域生态环境的可持续发展提供了有益参考。

2008 年 10 月 23 日, 中华人民共和国国土资源部出台了《全国土地利用总体规划纲要(2006—2020 年)》^[19], 国土资源部庄严承诺坚决守住“18 亿亩耕地红线”^[20], 从此全国各地开始严守土地红线政策。因此, 为了进一步深入揭示长江流域生态系统服务的变化, 笔者以长江上游具有重要生态功能的岷江流域三江汇流区——乐山市中区为研究区域, 选择严守耕地红线政策前后各 5 年土地利用史, 分析土地利用变化与生态系统服务变化, 为保护土地资源、提升今后的合理调控土地利用、改善岷江流域三江汇流区的生态环境提供参考。

1 资料与方法

1.1 研究区概况 岷江流域三江汇流区处于岷江中下游的乐山市中区 (103° 31' 56" ~ 103° 59' 25" E, 29° 28' 05" ~ 29° 45' 45" N), 岷江由北向南贯穿境内中部, 岷江支流大渡河、青衣江、峨眉河、临江河、泥溪河、凌云河从东西两侧汇流于此, 形成岷江、大渡河、青衣江三江交汇区。地形总趋势表现为西北高、东南低, 四周高、中部低。全区幅员面积 837 km², 属于山地丘陵地貌, 海拔 372.4~513.7 m, 中亚热带湿润季风气候, 年平均降水量在 1 000 mm 以上, 年均气温 16.5~18.0 ℃。2016 年末户籍人口 62.59 万, 其中, 城镇人口 36.7 万, 乡村人口 25.88 万。全年农作物总播种面积 30 490 hm²; 森林面积 3.1 万 hm², 森林覆盖率 37.1%。

1.2 数据来源 该研究土地基础数据来源于《乐山市土地

基金项目 乐山师范学院科研启动项目(XJR18003); 四川省社会科学重点研究基地—四川旅游发展研究中心立项课题(LYC8-08, LYC17-34); 四川省社科联基地规划项目(SC16E021)。
作者简介 武克军(1978—), 男, 宁夏中卫人, 讲师, 博士, 从事生态恢复与环境效应研究。
收稿日期 2018-07-10; **修回日期** 2018-07-26

利用总体规划(2006—2020 年)》和乐山市土地利用总体规划(2006—2020 年)调整完善方案 2014 年调整完善版。根据《土地利用现状分类(GB/T 21010—1996)》分类,结合市中区土地利用现实,研究期间水域面积没有变化,因此将市中区土地利用类型分为耕地、林地、草地、园地和建设用地 5 类。耕地对应农田,林地对应森林,园地取森林和草地的平均值,建设用地对应荒地。

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用变化。

1.3.1.1 土地利用类型变化。土地利用类型变化指土地利用从 a 时期到 b 时期的变化^[21],计算公式如下:

$$K_i = \frac{U_{bi} - U_{ai}}{U_{ai}} \times \frac{1}{T} \times 100\%$$
 (1)

式中, K_i 为 i 种土地利用类型变化率; $i=1,2,\cdots,n$,为土地利用类型; U_{ai} 为研究初期 a 时间段 i 种土地利用类型面积; U_{bi} 为研究末期 b 时间段 i 种土地利用类型面积; T 为研究时间段,单位为年。

1.3.1.2 土地利用程度变化。土地利用程度变化反映土地

利用综合水平和变化趋势^[22],计算公式为:

$$R = \frac{L_b - L_a}{L_a}$$
 (2)

$$L = 100 \times \sum_{i=1}^n (A_i \times C_i)$$
 (3)

式中, R 为土地利用程度变化率,若 $R>0$,土地利用处于发展时期; $R<0$,土地利用处于衰退期; $R=0$,土地利用处于稳定期。 L 为土地利用程度综合指数; L_a 、 L_b 分别为 a 和 b 时期的土地利用程度综合指数; A_i 为 i 级土地分级指数,指数参照高志强等^[23]的研究; C_i 为 i 级土地类型面积百分比。

1.3.2 生态系统服务价值评价方法。采用谢高地等^[24-26]单位面积当量法进行评价,生态系统服务价值计算公式如下:

$$ESV = \sum_{j=1}^n A_j \times E_{rj}$$
 (4)

式中, A_j 为 j 类生态系统面积(hm^2); E_{rj} 为 j 种生态系统 r 种生态服务功能单位面积生态服务价值。

我国地形复杂,生物量差异显著,为了反映各省份生态服务单价,将谢高地等^[24-26]研究出四川修正系数 1.35 相乘得出乐山市中区生态服务价值系数(表 1)。

表 1 乐山市中区生态服务价值系数

Table 1 Ecological service value coefficient in central district of Leshan City

元/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)

一级类型 First-level type	二级类型 Secondary type	耕地 Plowland	园地 Garden area	林地 Forest	草地 Grassland	建设用地 Construction land
供给服务 Supply service	食物生产	1 194.62	238.95	119.48	358.43	11.88
	原材料	119.48	1 582.74	3 105.81	59.67	0.00
调节服务 Adjustment service	气体调节	597.24	2 568.31	4 180.95	955.67	0.00
	气候调节	1 063.13	2 150.21	3 225.29	1 075.14	0.00
	水源涵养	716.72	2 389.10	3 822.53	955.67	35.78
	废物处理	1 959.12	1 564.92	1 564.92	1 564.92	11.88
支持服务 Support service	土壤形成	1 744.07	3 494.07	4 658.72	2 329.43	23.90
	生物多样	848.07	2 598.14	3 894.21	1 302.08	406.08
文化服务 Cultural service	娱乐文化	11.88	788.40	1 529.01	47.79	11.88
合计 Total		8 254.31	17 374.84	26 100.92	8 648.78	501.40

2 结果与分析

2.1 土地利用变化

2.1.1 各土地利用类型面积变化。从表 2 可以看出,2005—2014 年乐山市中区土地利用变化表现为“三减两增”。耕地、园地和草地面积减少,林地和建设用地面积增加。10 年平均面积减少的类型依次为园地(-488.90 hm^2)、耕地(-376.10 hm^2)和草地(-3.10 hm^2);林地面积增加较多(769.20 hm^2),其次为建设用地(616.10 hm^2)。建设用地变化最迅速(8.20%),草地变化最缓慢(-0.16%)。

2.1.2 各土地利用程度率变化。从表 2 可以看出,2005—2014 年乐山市中区土地利用程度表现为“一衰退四发展”。耕地(-1.19)处于衰退期,林地(0.12)、园地(0.22)、草地(0.10)和建设用地(0.06)处于发展期。土地利用程度综合指数表现为“三降低二增加”;耕地、园地和草地的利用程度降低,林地和建设用地的利用程度增加。总体而言,耕地利用程度最高,其次是林地、建设用地、草地和园地。

2.2 土地生态服务价值

2.2.1 生态系统服务价值及其年均变化。从表 3 可看出,2005—2014 年乐山市中区总生态系统服务价值缓慢增加,10 年平均 ESV 价值增加 875.99 万元。从土地利用类型来看,与 2005 年比较,整体表现为“三减两增”趋势,其中耕地、园地和草地的 ESV 减少,林地和建设用地的 ESV 增加;林地的 ESV 年均增加量最多(2 007.68 万元)。从 ESV 的年均变化率来看,与 2005 年比较,园地 ESV 年均减少最迅速(-7.00%),而建设用地的 ESV 增加最快(8.20%)。

2.2.2 一级生态系统服务价值变化。2005—2014 年乐山市中区各土地类型一级服务 ESV 及其变化年均变化较慢,整体呈现增加趋势。与 2005 年比较,10 年内供给服务年均增加 110.21 万元,调节服务年均增加 398.53 万元,支持服务年均增加 287.92 万元,文化服务年均增加 79.34 万元。尽管文化服务年均增加量较少,但是在一级服务类型中,文化服务是增长率最快的(1.75)。

表 2 2005—2014 年乐山市中区土地利用变化

Table 2 Land use change in Central District of Leshan City from 2005 to 2014

土地利用类型 Land-use type	面积 Area hm ²			年均变化量 Annual average change//hm ²			年均变化率 Average annual rate//%			利用程度综合指数 Comprehensive index of land use degree(L)			利用程度变化 Variation in utilization(R)//%		
	2005	2009	2014	2005— 2009	2010— 2014	2005— 2014	2005— 2009	2010— 2014	2005— 2014	2005	2009	2014	2005— 2009	2010— 2014	2005— 2014
耕地 Plow	28 561.00	21 102.00	24 800.00	-1 491.80	739.60	-376.10	-5.22	3.50	-1.32	121.27	98.83	98.12	-0.19	-0.01	-1.19
园地 Garden area	6 989.00	7 750.00	2 100.00	152.20	-1 130.00	-488.90	2.18	2.18	-7.00	19.78	24.20	5.54	0.22	-0.07	0.22
林地 Forest	25 670.00	26 044.00	33 362.00	74.80	1 463.60	769.20	0.29	0.29	3.00	72.66	81.32	87.99	0.12	0.08	0.12
草地 Grassland	1 923.00	1 915.00	1 892.00	-1.60	-4.60	-3.10	-0.08	-0.08	-0.16	8.16	8.97	7.49	0.10	-0.17	0.10
建设用地 Con- struction land	7 514.00	7 246.00	13 672.00	-53.60	1 285.80	616.10	-0.71	-0.71	8.20	21.27	22.62	36.07	0.06	0.59	0.06

表 3 乐山市中区土地利用类型生态系统服务价值及其年均变化率

Table 3 The ecosystem service value and annual average rate of change of land use type in the central district of Leshan City

土地利用类型 Land-use type	ESV//万元			年均变化量 Annual average change//万元			年均变化率 Average annual rate//%		
	2005	2009	2014	2005—2009	2010—2014	2005—2014	2005—2009	2010—2014	2005—2014
耕地 Plow	23 575.19	17 418.29	20 470.74	-1 231.38	610.49	-310.45	-5.22	3.50	-1.32
园地 Garden area	12 143.28	13 465.50	3 648.72	264.45	-1 963.36	-849.46	2.18	-14.58	-7.00
林地 Forest	67 001.06	67 977.24	87 077.89	195.23	3 820.13	2 007.68	0.29	5.62	3.00
草地 Grassland	1 663.16	1 656.25	1 636.35	-1.38	-3.98	-2.68	-0.08	-0.24	-0.16
建设用地 Construc- tion land	376.75	363.31	685.66	-2.69	64.47	30.89	-0.71	17.74	8.20
总计 Total	104 759.45	100 880.58	113 519.36	-775.77	2 527.76	875.99	-0.74	2.51	0.84

表 4 乐山市中区土地类型一级生态系统服务价值及其年均变化率

Table 4 Land type first-level ecosystem service value and its annual average rate in the central district of Leshan City

一级类型 First-level type	ESV//万元			年均变化量 Annual average change//万元			年均变化率 Average annual rate//%		
	2005	2009	2014	2005—2009	2010—2014	2005—2014	2005— 2009	2010— 2014	2005— 2014
供给服务 Supply service	13 395.03	12 673.44	14 497.09	-144.32	364.73	110.21	-1.08	2.88	0.82
调节服务 Adjustment service	52 198.34	50 097.50	56 183.64	-420.17	1 217.23	398.53	-0.80	2.43	0.76
支持服务 Support service	34 638.05	33 473.65	37 517.24	-232.88	808.72	287.92	-0.67	2.42	0.83
文化服务 Cultural service	4 528.03	4 635.99	5 321.40	21.59	137.08	79.34	0.48	2.96	1.75
总计 Total	104 759.45	100 880.58	113 519.36	-775.77	2 527.76	875.99	-0.74	2.51	0.84

2.2.3 二级生态系统服务价值变化。从表 5 可看出,2005—2014 年乐山市中区各土地类型二级服务 ESV 呈现“二减七增”的缓慢增加趋势(0.84%)。与 2005 年比较,从年均增加的 ESV 来看,气体调剂(173.28 万元)、生物多样性(165.24 万元)、原材料生产(157.01 万元)和水源涵养(152.18 万元)增加量较多。从年均变化率来看,10 年内年均 ESV 增加的有娱乐文化(1.75%)、原材料(1.66%)、气体调节(1.20%)、生物多样性(1.12%)、水源涵养(1.11%)、气候调节(0.79%)和土壤形成(0.62%);年均 ESV 减少的土地类型有食物生产(-1.18%)和废物处理(-0.27%)。

表 5 乐山市中区各土地类型二级生态系统服务价值及其年均变化率

Table 5 Land type secondary ecosystem service value and its annual average rate in the central district of Leshan City

二级类型 Secondary type	ESV//万元			年均变化量 Annual average change//万元			年均变化率 Average annual rate//%		
	2005	2009	2014	2005—2009	2010—2014	2005—2014	2005— 2009	2010— 2014	2005— 2014
食物生产 Food production	3 963.51	3 094.49	3 495.51	-173.80	80.20	-46.80	-4.39	2.59	-1.18
原材料 Raw material	9 431.51	9 578.95	11 001.58	29.49	284.53	157.01	0.31	2.97	1.66
气体调节 Gas regulation	14 417.04	14 322.61	16 149.80	-18.89	365.44	173.28	-0.13	2.55	1.20
气候调节 Climate regulation	13 025.26	12 515.66	14 051.74	-101.92	307.22	102.65	-0.78	2.45	0.79
水源涵养 Water conservation	13 739.86	13 528.31	15 261.64	-42.31	346.67	152.18	-0.31	2.56	1.11
废物处理 Waste treatment	11 016.18	9 730.92	10 720.47	-257.05	197.91	-29.57	-2.33	2.03	-0.27
土壤形成 Soil formation	19 848.09	18 984.81	21 074.88	-172.65	418.01	122.68	-0.87	2.20	0.62
生物多样 Biodiversity	14 789.97	14 488.83	16 442.35	-60.23	390.70	165.24	-0.41	2.70	1.12
娱乐文化 Entertainment culture	4 528.03	4 635.99	5 321.40	21.59	137.08	79.34	0.48	2.96	1.75
总计 Total	104 759.45	100 880.58	113 519.36	-775.77	2 527.76	875.99	-0.74	2.51	0.84

3 结论与讨论

(1) 岷江流域三江汇流区林地面积增加最迅速, 园地面积减少最迅速, 草地变化缓慢。2005—2014 年土地利用程度表现为“一衰退四发展”。耕地利用程度最高且处于衰退期, 园地等 4 种土地类型处于发展期。表明今后的土地利用应该在保护耕地红线的基础上, 积极发展其他类型。

(2) 岷江流域三江汇流区生态系统服务价值缓慢增加, 主要归因于林地的 ESV 年均增加量最多(2 007.68 万元)。表明林地在中区的生态系统服务中具有不可替代的主导作用, 今后的土地利用需要继续林地的面积。

(3) 岷江流域三江汇流区调节服务功能年均增加最多(398.53 万元), 而文化服务年均增加速度最快(1.75%)。揭示了市中区今后需要继续增强调节服务功能和文化服务功能。

(4) 岷江流域三江汇流区气体调节功能的年均增加量最多(173.28 万元), 而文化娱乐功能的年均增加率最高(1.75%)。表明气体调节和文化娱乐功能在市中区具有重要的价值, 今后的土地利用应该加强这 2 种功能的维护。

参考文献

- [1] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展[J]. 地理科学进展, 2014, 33(4): 441–446.
- [2] COSTANZA R, D'ARCE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387(6630): 253–260.
- [3] DAILY G C. Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems[M]. Washington, DC: Island Press, 1997.
- [4] Millennium Ecosystem Assessment(MEA). Ecosystems and human well-being: Synthesis[M]. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [5] FU B J, WANG S, SU C H, et al. Linking ecosystem processes and ecosystem services[J]. Current opinion in environmental sustainability, 2013, 5(1): 4–10.
- [6] BRAAT L, TEN B P. The cost of policy inaction: The case of not meeting the 2010 biodiversity target. Brussels[C]. Belgium: The COPI Project, 2008.
- [7] 高吉喜. 划定生态保护红线, 推进长江经济带大保护[J]. 环境保护,

2016, 44(15): 21–24.

- [8] 程建, 程久苗, 吴九兴, 等. 2000–2010 年长江流域土地利用变化与生态系统服务功能变化[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(6): 894–901.
- [9] XU C P, XIA B. Land use changes and its influences on ecosystem service value of resources-based city[J]. Ecology and environmental sciences, 2010, 19(12): 2887–2891.
- [10] 杨桂山, 徐晋保, 李平星. 长江经济带绿色生态廊道建设研究[J]. 地理科学进展, 2015, 34(11): 1356–1367.
- [11] 虎陈霞, 郭旭东, 连纲, 等. 长三角快速城市化地区土地利用变化对生态系统服务价值的影响: 以嘉兴市为例[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(3): 333–340.
- [12] 尹占娥, 田娜, 殷杰, 等. 基于遥感的上海市湿地资源与生态服务价值研究[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(6): 925–930.
- [13] 许妍, 高俊峰, 黄佳聪. 太湖湿地生态系统服务功能价值评估[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(6): 646–652.
- [14] 李全, 李腾, 杨明正, 等. 基于梯度分析的武汉市生态系统服务价值时空分异特征[J]. 生态学报, 2017, 37(6): 2118–2125.
- [15] 张嵩, 高明, 杨乐, 等. 1988–2013 年重庆市主城九区生态用地空间结构及其生态系统服务价值变化[J]. 生态学报, 2017, 37(2): 566–575.
- [16] 王鹏涛, 张立伟, 李英杰, 等. 汉江上游生态系统服务权衡与协同关系时空特征[J]. 地理学报, 2017, 72(11): 2064–2078.
- [17] 彭文甫, 周介铭, 罗怀良, 等. 城市土地利用变化对生态系统服务价值损益估算: 以成都市为例[J]. 水土保持研究, 2011, 18(4): 43–51.
- [18] 武克军, 王海军, 白洁, 等. 西南山地旅游城市土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J/OL]. 安徽农业科学, 2018, 46(20): 66–69 [2018–06–26]. <https://doi.org/10.13989/j.cnki.0517-6611.2018.20.019>.
- [19] 中华人民共和国国土资源部. 全国土地利用总体规划纲要(2006–2020 年)[A/OL]. (2008–10–24) [2018–06–26]. http://www.mlr.gov.cn/xwdt/jrxxw/200810/t20081024_111040.htm.
- [20] 徐绍史. 坚决守住 18 亿亩耕地红线[J]. 国家行政学院学报, 2008(1): 8–11.
- [21] 朱会义, 李秀彬. 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J]. 地理学报, 2003, 58(5): 643–650.
- [22] 王秀兰, 包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨[J]. 地理科学进展, 1999, 18(1): 81–87.
- [23] 高志强, 刘纪远, 庄大方. 中国土地资源生态环境背景与利用程度的关系[J]. 地理学报, 1998, 53(S1): 36–43.
- [24] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189–196.
- [25] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243–1254.
- [26] 谢高地, 肖玉, 甄霖, 等. 我国粮食生产的生态服务价值研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(3): 10–13.

(上接第 67 页)

- [15] 黄园. 微藻培养过程中轮虫污染防治研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2014.
- [16] 张晶, 侯和胜, 佟少明. 微藻与细菌作用关系的研究进展[J]. 激光生物学, 2016, 25(5): 385–390.
- [17] 涂仁杰, 金文标, 韩松芳, 等. 细菌对城市污水中小球藻生长和油脂积累的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(10): 4279–4285.
- [18] SUYONO E A, RETNANINGRUM E, AJIJAH N. Bacterial symbionts isolated from mixed microalgae culture of Glagah strains[J]. International journal of agriculture & biology, 2018, 20(1): 33–36.
- [19] GONZÁLEZ-CAMEJO J, BARAT R, PACHÉS M, et al. Wastewater nutrient removal in a mixed microalgae-bacteria culture: Effect of light and temperature on the microalgae-bacteria competition[J]. Environmental technology, 2017, 39(4): 503–515.
- [20] 王晴晴, 高金伟, 时晓婷, 等. 海洋饵料微藻与共栖细菌相互关系研究进展[J]. 农业与技术, 2016, 36(7): 11–12.
- [21] 迟雯丹. 海洋细菌 *Ponticoccus* sp. PD-2 群体感应系统及对抑藻功能的调控探究[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2017.
- [22] 王善龙, 曹煜成, 徐煜, 等. 蜡芽孢杆菌对对虾养殖水体微藻群落的调控研究[J]. 南方水产科学, 2016, 12(1): 9–16.
- [23] 朱晓漫, 罗玉双, 李娜, 等. 一株溶藻细菌的分离、筛选与分子鉴定[J]. 湖南文理学院学报(自然科学版), 2017, 29(1): 28–34.

- [24] 郝建云, 曹煜成, 徐武杰, 等. 溶藻细菌 A3 的溶藻特性[J]. 渔业科学进展, 2016, 37(6): 151–158.
- [25] MITSUTANI A, YAMASAKI I, KITAGUCHI H, et al. Analysis of algicidal proteins of a diatom-lytic marine bacterium *Pseudoalteromonas* sp. strain A25 by two-dimensional electrophoresis[J]. Phycologia, 2001, 40(3): 286–291.
- [26] 刘晓娟, 段舜山. 眼点拟微绿球藻对抗生素的敏感性及其无藻菌株的培养[J]. 生态科学, 2006, 25(6): 493–495.
- [27] 宋程飞, 郝敬云, 程蔚兰, 等. 杜氏盐藻无菌体系的建立[J]. 山西农业科学, 2018, 46(1): 25–28, 97.
- [28] 崔晓波, 曲文彦, 高文秀. 水体抗生素污染现状及藻类生态风险评价[J]. 山西农业科学, 2017, 45(12): 2056–2062.
- [29] 李文君, 蓝梅, 彭先佳. UV/H₂O₂ 联合氧化法去除畜禽养殖废水中抗生素[J]. 环境污染与防治, 2011, 33(4): 25–32.
- [30] 王琛, 李梦凯, 阎荣雷, 等. 紫外/真空紫外反应器对磺胺类抗生素的去除研究[J]. 中国给水排水, 2016, 32(9): 53–57.
- [31] 张杏艳, 陈中华, 邓海明, 等. 水环境中四环素类抗生素降解及去除研究进展[J]. 生态毒理学报, 2016, 11(6): 44–52.
- [32] RICHMOND A, HU Q. Handbook of microalgal culture[M]. 2nd Edition. Chichester: Wiley-Blackwell, 2013: 40–41.
- [33] 耿金峰, 张惠敏, 石蕾, 等. 反应器培养眼点拟微绿球藻时摆向、光程对产量的影响[J]. 水产科学, 2016, 35(5): 541–546.