

基于土地利用变化的新疆生态系统服务价值研究

刘川, 石晶* (塔里木大学经济与管理学院, 新疆阿拉尔 843300)

摘要 [目的]分析生态系统服务价值在新疆土地利用变化前后的变化,具体探讨利用土地方式改变对其生态系统服务价值造成的影响。[方法]借鉴前人研究总结的评估方法和中国生态系统价值当量表,分析修正了不同类型生态系统服务价值系数,进而计算新疆生态系统服务价值。[结果]新疆的未利用土地达58%以上,2007—2016年园地、建设用地面积有较大增幅,牧草地面积呈现减少趋势;2007—2016年研究区生态系统服务价值由2007年的41 385.08亿元上升至2016年的41 694.78亿元,增加309.70亿元,表明研究区域总生态系统服务价值出现增长;通过计算敏感性指数,表明新疆生态系统服务价值相对于生态价值系数来说均缺乏弹性,因此所选取的价值系数对于研究区而言是较为合适的。[结论]该研究为干旱区的土地利用、维护生态安全提供科学依据。

关键词 土地利用;生态系统服务价值;敏感指数;新疆

中图分类号 F 301 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2019)10-0070-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.10.021



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Study on Xinjiang Ecosystem Service Value Based on Land Use Change

LIU Chuan, SHI Jing (College of Economics and Management, Tarim University, Alar, Xinjiang 843300)

Abstract [Objective] The research aimed to analyze the changes of ecosystem service value before and after the change of land use in Xinjiang, and specifically explore the impact of land use change on the value of its ecosystem services. [Method] Based on the evaluation methods summarized by previous studies and the China Ecosystem Value Equivalent Table, the value coefficient of different types of ecosystem services was analyzed and corrected, and the value of ecosystem services in Xinjiang was calculated. [Result] The unused land in Xinjiang reached more than 58%, the area of garden and construction land increased greatly from 2007 to 2016, and the area of pasture decreased. From 2007 to 2016, the ecosystem service value of the research area increased from 4138.508 billion yuan in 2007 to 4169.478 billion yuan in 2016, with an increase of 30.970 billion yuan, indicating that the total ecosystem service value of the research area increased. By calculating the sensitivity index, it shows that the value of ecosystem services in Xinjiang was inelastic compared with the ecological value coefficient, so the value coefficient selected in this paper was appropriate for the research area. [Conclusion] This study provides a scientific basis for land use and ecological security in arid areas.

Key words Land use; Ecosystem service value; Sensitivity index; Xinjiang

人类间接或直接获取生态系统服务,以得到维持人类生存与社会发展的物质基础,如今生态系统面临着日益严重的威胁,并已成为制约人类可持续发展的全球性问题^[1-2],维持生态系统健康持续运转,维护国家生态安全是一项艰巨和迫切的任务。土地作为陆地各类生态系统的主要载体,了解利用土地方式和具体形式的改变对其服务价值造成的影响,并且了解两者作用影响的关系显然非常重要。新疆多数区域都是荒漠、沙漠和戈壁,气候类型为温带大陆型,干旱且极少降雨,全年降水均值仅150 mm,是典型的干旱区。近年来新疆工业化、城镇化迅速推进,加之新疆作为“一带一路”倡议推进的桥头堡,经济发展的需求与因生态环境脆弱的维护生态安全的目的,两者之间冲突日益加剧。因此认识新疆土地利用对生态系统服务功能的影响,可以从土地规划利用角度出发,为维护干旱区生态安全提供一条新思路。

20世纪就已经有研究人员对于生态系统服务价值展开了研究,如Costanza等^[3]就采用生态学和经济学相结合的方法对生态系统价值进行量化,建立了生态系统服务价值定量分析的方法和基本原理。此后,国内也涌现了许多相关研究^[4-7],如谢高地等^[5]针对Costanza等的研究在中国运用的

缺陷,同时结合生态专家团队(200人)的调查问卷分析结果,构建了新的单价评估系统;王崇等^[6]结合谢高地等提出的生态系统服务价值系数,运用遥感技术获取到的安徽地区真实数据,进行了价值计算。目前,中国已有学者对新疆生态系统服务价值方面进行了相关研究^[8-11],如杨丽文等^[8]在新疆和田河流域范围内展开研究,着重分析了其中怪柳灌木天然林地,评价了其生态系统服务价值;王燕等^[10]在新疆结合RS技术和GIS技术展开研究,重点选取了自然保护区(6个保护区均为国家级)作为研究对象,基于研究地区内土地利用改变以及该地区生态系统,重点评估了相应服务价值的改变;万勤等^[11]依据11年新疆兵团土地利用数据,分析了新疆兵团生态服务价值在时间和空间上的变化特征。从已有的文献看出,关于新疆生态系统服务价值的研究大多从某一生态系统、某一地区来研究,较少从全区的尺度上来研究。笔者研究生态服务价值计算过程援用了Costanza等^[3]提出的算法,并参考了谢高地等^[5]针对我国陆地生态系统价值当量进行换算的模型,基于新疆真实状况,修正了系数表;利用数据建模方法,主要利用敏感性指数,对新疆地区土地利用、生态系统服务价值等进行量化分析,指出了前者的改变对后者造成的影响。

1 资料与方法

1.1 数据来源 该研究所用的土地利用/覆被的变更数据、社会经济数据来源于2008—2017年新疆维吾尔自治区国土资源厅详查数据和《新疆维吾尔自治区统计年鉴》。根据搜

基金项目 国家社科基金项目(16XMX090);兵团优秀青年教师培养计划项目。

作者简介 刘川(1995—),男,四川西充人,硕士研究生,研究方向:农业经济、区域经济。*通信作者,教授,博士,硕士生导师,从事资源环境、区域经济研究。

收稿日期 2018-11-21; **修回日期** 2018-12-04

集数据结合中国科学院土地资源分类划分标准,对土地利用类型重新归并、分类。根据标准将土地利用类型分为7个类型、耕地类型、园地类型、林地类型、牧草地类型、建设用地类型、水域类型、未利用土地类型。

1.2 土地利用变化速率计算 该研究选取土地利用动态度作为研究指标,表示研究区一年内某种土地利用/土地覆盖类型的变化幅度,直接反映了研究区某种土地利用类型变化的速度^[12],其土地利用动态度(R_t)计算公式为:

$$R_t = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中, U_a 、 U_b 为研究时期内同一土地利用类型发生变化前后的土地面积; T 为研究期年数。

1.3 不同土地利用类型生态系统服务价值确定方法

1.3.1 单位生态系统服务价值当量因子价值计算。1个标准单位生态系统生态服务价值当量因子是指1 hm²全国平均产量的农田每年自然粮食产量的经济价值^[13]。结合新疆实际的农业生产,以新疆主要农产品小麦、玉米和水稻的播种面积、产量为代表农产品;为避免因农产品价格而导致新疆生态系统服务价值量的过低估计,以各类产品在2016年的市价为计算基准数据。自然生态系统作用条件和人力生产条件2种不同条件下,创造经济价值的比值为1:7,计算新疆农田自然条件下农作物产出经济价值约2 145.145元/hm²。其计算模型为:

$$M_a = 1/7 \sum_{i=1}^n \frac{e_i p_i q_i}{E} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中, M_a 为单位生态系统服务价值当量因子的经济价值(元/hm²); i 为某一种农产品; p_i 为第*i*种农产品全国平均价(元/kg); q_i 为第*i*种农产品单产(kg/hm²); e_i 为第*i*种农作物面积(hm²); E 为所有农作物种植总面积; n 为农作物类型数量。

1.3.2 生态系统服务价值当量因子的确定。在确定单位生态系统服务价值当量因子的经济价值之后,以此当量为参照可以确定其他生态系统服务的当量因子,其作用在于可以表征和量化不同类型生态系统对生态服务功能的潜在贡献能力^[14]。

耕地、林地、牧草地、水域的生态系统服务价值当量确定参考中国生态系统服务价值当量因子表^[5]。对于建设用地, Costanza等^[3]研究指出建设用地不能造成任何生态系统服务价值,也少有研究对其生态系统服务价值进行研究和赋值。但建设用地是人为因素与自然因素相互交织、相互作用下形成的生态系统;对水的消耗造成水源涵养功能的减弱,人类活动减弱了废物处理能力,但增加了土壤形成与保护功能;由于建设用地对大气、气候等环境因素的影响具有累积效应,难以界定其影响范围和程度;所以结合文献^[15]对工矿、交通和民用地等建设用地的水源涵养、废物处理、土壤形成与保护3个方面的生态服务价值当量因子进行确定。基于园地利用特点对其生态服务价值当量因子的取值,取耕地和草地的平均值;未利用地主要由荒漠、荒草地和滩涂等构成,其生态服务价值当量因子取草地和荒漠的平均值。

1.3.3 生态服务价值系数修正。在明确单位生态系统服务价值当量因子的经济价值后,结合已确定的不同类型生态系统服务价值当量因子、不同土地利用方式的面积数据,按照转化公式(3),分别求解利用方式不同时生态服务价值系数数值,即可得到系数修正表(表1)。

$$VC_i = \sum_{j=1}^n e_{ij} M_a \quad (3)$$

式中, VC_i 为第*i*种生态系统的生态服务价值系数[元/(hm²·a)]; e_{ij} 为第*i*种生态系统的*j*种生态服务功能的生态系统服务价值当量因子; i 为某种生态系统类型; j 为某种生态服务功能; M_a 为单位生态系统服务价值当量因子的经济价值(元/hm²)。

表1 新疆地区不同生态系统服务价值系数

Table 1 Value coefficient of different ecosystem services in Xinjiang

生态因子 Ecological factor	耕地 Arable land	园地 Garden land	林地 Woodland	牧草地 Pasture	建设用地 Construction land	水域 Waters	未利用土地 Unused land
食物生产 Food production	2 145.15	2 391.84	1 994.98	2 638.53	0	1 651.76	1 319.26
原材料 Raw material	214.51	311.05	5 856.25	407.58	0	21.45	214.51
气体调节 Gas regulation	278.87	450.48	1 394.34	622.09	0	128.71	493.38
气候调节 Climate regulation	2 145.15	2 295.31	6 649.95	2 445.47	0	1 458.70	1 351.44
水源涵养 Water conservation	278.87	343.22	5 062.54	407.58	-12 570.55	263 809.93	203.79
废物处理 Waste treatment	364.67	1 898.45	3 818.36	3 432.23	-4 097.23	214.51	1 726.84
土壤形成与保护 Soil formation and protection	3 646.75	4 408.27	19 005.98	5 169.80	6 542.69	471.93	2 584.90
生物多样性 Biodiversity	2 145.15	4 933.83	8 151.55	7 722.52	0	1 866.28	3 936.34
娱乐文化 Entertainment culture	128.71	450.48	3 861.26	772.25	0	8 516.23	407.58
总计 Total	11 347.83	17 482.93	55 795.21	23 618.05	-10 125.09	278 139.50	12 238.04

对表1数据分析可知,生态系统类型不同则其相应的生态功能也完全不同,后者之强弱与系统内生物量之间存在紧密联系,通常来讲,内涵生物量规模越大,则系统也就具备更

强的生态服务功能。从服务价值系数指标分析,该研究生态系统对象中林地和水域两类用地的这一指标数据较大,最小的为建设类且为负值,说明建设用地对新疆生态价值有严重

损害。其中林地的气体、气候调节功能、废物处理、土壤形成与保护等功能较强,水域的水源涵养、娱乐文化功能的生态服务价值系数较高。

1.3.4 生态系统服务价值计算。生态系统服务价值(ESV)计算公式:

$$ESV = \sum A_i \times VC_i \quad (4)$$

式中,ESV 为生态系统服务价值(元/a); A_i 为第 i 类土地面积(hm^2); VC_i 为第 i 种生态系统的生态服务价值系数[元/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)]。

1.4 生态服务价值敏感性计算 为验证土地利用发生的改变导致生态系统类型变化进而导致生态系统服务价值改变的有效性,所以选择用敏感性指数(CS)计算生态系统服务价值对生态价值系数的敏感性,进而反映生态价值参数改变的有效性和准确性。方程式如下:

$$CS = \left| \frac{(ESV_j - ESV_i) / ESV_i}{(VC_{jk} - VC_{ik}) / VC_{ik}} \right| \quad (5)$$

式中, i, j 代表初始的状态值和调整以后的状态; k 为各类土地利用类型。如果 $CS > 1$, 表明 ESV 对 VC 是富有弹性的,CS 取值越高,表明 VC 的精准性越重要;如果 $CS < 1$, 表明 ESV 对 VC 是缺乏弹性的,CS 越小,表明生态系统服务价值系数的

准确性对计算生态系统服务价值影响越小。该研究通过对生态价值系数上下调整 50%, 来计算 CS 并分析 ESV 对其变化的敏感性。

2 结果与分析

2.1 土地利用变化 从表 2 可看出,10 年来新疆地区对土地的利用方式有较为明显的改变,水域、耕地、园地和建设等类型用地规模连年扩张,牧草地规模则逐步萎缩退化,同时原本土地中未利用部分也逐步得到了开发利用。其中以园地面积增加的幅度最多、速度最快,其次是建设用地面积。园地增加主要原因是由于新疆的地理位置使其具有日照时间长、昼夜温差大等独特的气候资源,这对发展特色林果业具有明显的优势。近年来,新疆城镇化进程高速推进,基础设施建设投入加大,使建设用地面积快速增加。在不同的土地利用方式中,值得警惕的是新疆的牧草地退化趋势明显,共减少 $22.34 \times 10^4 \text{ hm}^2$; 主要由于新疆极端荒漠气候造成牧草地生态系统脆弱极易退化,人为因素影响下造成的对牧草地的侵占,这严重地威胁干旱区生态安全。新疆大面积的土地处于未利用状态,得益于近年新疆快速的发展,在垦荒、开发建设等因素的影响下,对其土地资源得到更充分利用。

表 2 2007—2016 年新疆土地利用变化

Table 2 Changes of land use in Xinjiang from 2007 to 2016

土地利用类型 Land use type	2007 年		2016 年		2007—2016 年		
	面积 Area $\times 10^4 \text{ hm}^2$	百分比 Percentage %	面积 Area $\times 10^4 \text{ hm}^2$	百分比 Percentage %	变化量 Amount of change $\times 10^4 \text{ hm}^2$	变化率 Change rate//%	动态度 Dynamic degree %
耕地 Arable land	411.42	2.47	420.94	2.53	9.52	2.31	0.26
园地 Garden land	36.45	0.22	42.38	0.25	5.93	16.27	1.81
林地 Woodland	676.54	4.06	685.49	4.12	8.95	1.32	0.15
牧草地 Pasture	5 111.93	30.71	5 089.59	30.57	-22.34	-0.44	-0.05
建设用地 Construction land	123.43	0.74	141.12	0.85	17.69	14.33	1.59
水域 Waters	471.58	2.83	484.12	2.91	12.54	2.66	0.30
未利用土地 Unused land	9 817.58	58.97	9 785.29	58.77	-32.29	-0.33	-0.04
总计 Total	16 648.93	100	16 648.93	100			

2.2 生态系统服务价值分析 从表 3 可看出,研究期内新疆省生态系统服务价值由 2007 年的 $41 385.08 \times 10^8$ 元上升至 2016 年的 $41 694.78 \times 10^8$ 元,9 年间增加 309.70×10^8 元,增加率达 0.75%。研究期间因为不同类型土地利用的占比发生的变化,所以全省生态服务价值发生了极大改变,两者之间存在紧密关联。水域对新疆生态系统服务价值的贡献最大,产生的影响最为显著,次之是牧草地,所以水域、牧草地两类用地在全省生态服务价值体系内极为重要。

研究时段中使用类型不同的土地生态系统服务价值的改变状况并不相同。2007—2016 年,耕地、园地和林地的生态系统服务功能持续增加,水域增加数量最多,达 348.79×10^8 元,园地增加率最大,为 16.27%,而牧草地、未利用土地生态系统服务价值减少,数量减少最多的是牧草地,达 -52.76×10^8 元。

2.3 生态系统服务价值敏感性分析 该研究将对 VC 指标增减 50% 予以修正调节,随后分别求解修正后的敏感性指数以及服务价值。从表 4 可看出,所得这 2 个时期指标数值都比 1 小,最大值为 0.322 9,最小值为 0.001 5。2007 年研究区各土地利用类型的敏感性指数(CS)由低到高的顺序依次是园地、建设用地、耕地、林地、未利用土地、牧草地、水域;2016 年园地敏感性指数最低,即当园地生态系统价值系数增加 1% 时,总价值只增加 0.001 8%,其中水域的敏感性指数最高,即当水域的生态价值系数增加 1% 时,生态系统服务总价值将增加 0.322 9%,其中主因在于研究区有较大水域面积,水域 VC 较大。因此,就 CS 指标而言,该研究区域内,新疆生态系统服务价值对生态服务系数缺乏任何弹性,说明该研究计算所得结果非常可靠,与当地实际状况完全吻合。

表 3 2006—2017 年新疆生态系统服务价值
Table 3 Ecosystem services value in Xinjiang from 2006 to 2017

土地利用类型 Land use type	VC 元/(hm ² ·a)	ESV//×10 ⁸ 元		2007—2016 年	
		2007 年	2016 年	ESV 变化值 ESV change value//×10 ⁸ 元	ESV 变化率 ESV change rate//%
耕地 Arable land	11 347.82	466.87	477.68	10.80	2.31
园地 Garden land	17 482.93	63.73	74.09	10.37	16.27
林地 Woodland	55 795.22	3774.77	3 824.71	49.94	1.32
牧草地 Pasture	23 618.05	12073.38	12 020.62	-52.76	-0.44
建设用地 Construction land	-10 125.08	-124.97	-142.89	-17.91	14.33
水域 Waters	278 139.50	13 116.50	13 465.29	348.79	2.66
未利用土地 Unused land	12 238.05	12 014.81	11 975.30	-39.52	-0.33
总计 Total	388 496.49	41 385.08	41 694.78	309.70	0.75

表 4 敏感性指数计算结果
Table 4 Calculation results of sensitivity index

土地利用类型 Land use type	VC	ESV//×10 ⁸ 元		CS	
		2007 年	2016 年	2007 年	2016 年
耕地 Arable land	VC+50%	41 618.517 4	41 933.622 4	0.011 3	0.011 5
	VC-50%	41 151.645 5	41 455.947 4		
园地 Garden land	VC+50%	41 416.944 1	41 731.831 3	0.001 5	0.001 8
	VC-50%	41 353.218 8	41 657.738 6		
林地 Woodland	VC+50%	43 272.466 4	43 607.138 3	0.091 2	0.091 7
	VC-50%	39 497.696 5	39 782.431 6		
牧草地 Pasture	VC+50%	47 421.771 5	47 705.093 6	0.291 7	0.288 3
	VC-50%	35 348.391 4	35 684.476 3		
建设用地 Construction land	VC+50%	41 322.594 5	41 623.044 7	0.003 0	0.003 4
	VC-50%	41 447.568 4	41 766.227 5		
水域 Waters	VC+50%	47 943.332 7	48 427.429 7	0.316 9	0.322 9
	VC-50%	34 826.830 2	34 962.140 2		
未利用土地 Unused land	VC+50%	47 392.484 3	47 682.429 4	0.290 3	0.287 2
	VC-50%	35 377.678 6	35 707.140 4		

3 结论与讨论

(1) 2007—2016 年新疆土地利用以牧草地为主,有超过 58% 的土地处于未开发状态,其他土地利用类型相对于新疆总体面积占比较小。由于特色林果业快速发展,导致园地面积快速增加;建设用地总量迅速扩张,大量牧草地、耕地被用于建设,同时对于未被利用的土地增加了开发程度;土地利用变化趋势是各类型的土地之间相互转化,其面积、所占比例及变化快慢均有不同的变化。

(2) 2007—2016 年新疆区域内因各土地利用类型的面积发生不同程度变化及相互转化,其新疆的生态服务价值由 2007 年的 $41\ 385.08 \times 10^8$ 元上升至 2016 年的 $41\ 694.78 \times 10^8$ 元,增加了 309.70×10^8 元,增加率达 0.75%。不过研究期内不同生态系统对于服务价值做出的贡献率的差异很大,其中做出较大贡献(超过 50%)的类型是牧草地和水域。

(3) 计算所得敏感性指数都小于 1,其值处于 0.001 5~0.322 9,可见此区域的生态系统服务价值对于各生态系统的服务价值系数变化缺乏弹性。

(4) 由于生态系统的复杂性、生态系统功能效果在空间上的差异性问题,在确定各生态系统的生态服务价值系数时,仍然存在不估计因素,与准确值存在一定偏差。因此该

研究基于 Costanza 等^[3]、谢高地等^[5]研究提出的计算方法和参数当量表,粗略估算了新疆生态系统的静态服务价值。

(5) 在现有研究中,未对建设用地的生态系统服务价值进行系统而全面的研究,计算生态系统服务价值过程中多数采用记零值。该研究考虑建设用地作为一个复合生态系统存在废物处理、水源涵养等生态功能,因此研究借鉴了前人的相关研究成果,对建设用地具有的功能进行了相应的赋值。由于建设用地的生态功能的复杂性,该研究没有做深入的研究。

参考文献

- [1] 李丽,王心源,骆磊,等.生态系统服务价值评估方法综述[J].生态学杂志,2018,37(4):1233-1245.
- [2] 桓曼曼.生态系统服务功能及其价值综述[J].生态经济,2001(12):41-43.
- [3] COSTANZA R, D'ARDE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.
- [4] 欧阳志云,王如松,赵景柱.生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J].应用生态学报,1999,10(5):635-639.
- [5] 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.
- [6] 王崇,王帅帅,吴见,等.基于土地利用变化的安徽省生态服务价值研究[J].水土保持通报,2015,35(4):242-247.

3 讨论与结论

甘蓝型油菜对土壤中的重金属镉与铜具有较强的吸附与富集能力,但是植株的不同部位对重金属的吸附富集能力有差异。研究表明,油菜植株对镉的吸收富集主要集中在茎叶部位尤其是茎秆上,其中各个部分富集能力表现为:茎秆>叶片>根>种籽,对铜的吸收富集主要集中在根部和种籽上,其中各个部分富集能力比较表现为:根>种籽>叶片>茎秆。王宁等^[17-19]对重金属镉在油菜中的富集研究表明,油菜体内 Cd 分布为地上部>地下部,随着 Cd 浓度的升高,油菜植株对 Cd 的吸收显著增加,而且油菜地上部分的吸收量显著高于地下部分,其中茎的 Cd 浓度最高,籽粒最低,与该研究结果基本一致。但也有研究认为油菜体内 Cd 积累规律为根部大于地上部^[20-21],这可能与各学者研究采取的研究方法与样品采集时间不同导致的分析数据差异,具体原因有待进一步试验验证。杨红飞等^[12]对重金属 Cu 在油菜中的富集研究表明,重金属 Cu 主要积累在油菜根部,向茎叶迁移累积的量很少;成熟期单一 Cu 污染和复合污染时油菜根茎叶中 Cu 含量及富集系数均为根>叶>茎,与该研究结果一致。

甘蓝型油菜对土壤中重金属镉与铜的富集能力在品种间有差异,同时在油菜的不同生长时期与不同植株器官部位也存在差异。参试的 10 个甘蓝型油菜品种对重金属镉的富集能力表现较大差异,苗期秦优 10 号与中油 589 对重金属镉的富集能力较强,成熟期秦优 11 号与绵油 11 号表现出对镉的超富集能力;对铜的富集能力品种间也表现出差异,苗期秦优 10 号等 3 个品种根系的铜富集能力较强,成熟期浙油 51 与秦优 10 号的种籽中铜含量较高。同时一些甘蓝型油菜品种表现出较低的重金属吸附富集能力,如中核杂 418 对镉的富集能力较弱,天禾油 11 与德油 99 等品种对铜的吸收富集能力较弱。因此在重金属污染土壤的修复过程中,可根据实际情况选择对重金属吸附富集能力强的甘蓝型油菜品种连续种植,结合秸秆与根的处理方法清除污染土壤中的重金属,从而保障农业的安全健康生产。

该研究中把种籽中的重金属含量也作为一项重要检测指标,结果表明 Cd 在植物中的迁移能力较强,茎叶中富集较多,但在籽粒中的含量较茎秆中低很多;Cu 则主要富集于植株根部与种籽中,但其含量在不同品种间差异显著,其机理有待进一步研究。因此通过品种的选择,有望得到在茎叶中重金属含量高而在籽粒中含量低的油菜品种,在修复污染土

壤中获得的油菜油脂可以研究开发作为生物柴油,这样既可提高农业生产经济效益,又可实现边生产边修复,比较符合我国目前农业土地资源有限、土壤重金属污染突出的实际国情。

参考文献

- [1] 傅国伟.中国水土重金属污染的防治对策[J].中国环境科学,2012,32(2):373-376.
- [2] 顾继光,林秋奇,胡韧,等.土壤-植物系统中重金属污染的治理途径及研究展望[J].土壤通报,2005,36(1):128-133.
- [3] 王小玻.重金属复合污染农田土壤植物修复的研究[D].昆明:昆明理工大学,2010.
- [4] SAIER M H, JR, TREVORS J T. Phytoremediation[J]. Water, air and soil pollution, 2010, 205(S1): 61-63.
- [5] SHAHEEN S M, RINKLEBE J. Phytoremediation of potentially toxic elements by Indian mustard, rapeseed, and sunflower from a contaminated riparian soil[J]. Environmental geochemistry and health, 2015, 37(6): 953-967.
- [6] 胡鹏杰,李柱,钟道旭,等.我国土壤重金属污染植物吸收修复研究进展[J].植物生理学报,2014,50(5):577-584.
- [7] 苏德纯,黄焕忠.油菜作为超累积植物修复镉污染土壤的潜力[J].中国环境科学,2002,22(1):48-51.
- [8] 王宁.我国油菜产业发展的现状及对策研究[J].现代经济信息,2015(12):356.
- [9] NG S H, SHI Y, HESHKA N E, et al. Laboratory production of biofuels and biochemicals from a rapeseed oil through catalytic cracking conversion[J/O]. J Vis Exp, 2016(115). doi:10.3791/54390.
- [10] 高永东.木霉菌-油菜联合吸附重金属技术构建与作用机理初步研究[D].上海:上海交通大学,2008.
- [11] 冯刚,王鑫,白九元,等.油菜对 Cd 污染土壤的修复潜力分析[J].四川大学学报(自然科学版),2018,55(1):172-178.
- [12] 杨红飞,王友保,李建龙.铜、锌污染对水稻土中油菜(*Brassica chinensis* L.)生长的影响及累积效应研究[J].生态环境学报,2011,20(10):1470-1477.
- [13] 邹佳佳,孟梅,张云,等.农田土壤铜污染评价和油菜铜积累特征研究[J].土壤通报,2015,46(3):621-627.
- [14] 湖北省地质实验研究所.区域地球化学样品分析方法: DZ/T 0279—2016[S].北京:中国标准出版社,2016.
- [15] 中华人民共和国国土资源部.地质矿产实验室测试质量管理规范 第二部分:岩石矿物分析试样制备: DZ/T 0130.2—2006[S].北京:地质出版社,2006.
- [16] 生态环境部,国家市场监督管理总局.土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行): GB 15618—2018[S].北京:中国标准出版社,2018.
- [17] 王宁,南忠仁,王胜利,等. Cd/Pb 胁迫下油菜中重金属的分布、富集及迁移特征[J].兰州大学学报(自然科学版),2012,48(3):18-22.
- [18] 刘春艳. Cu、Cd 单一及复合污染对油菜生长发育的影响[D].芜湖:安徽师范大学,2012.
- [19] 王一兴. 镉对甘蓝型油菜苗期生长的影响[D].南京:南京农业大学,2011.
- [20] 武琳霞,丁小霞,李培武,等.我国油菜镉污染及菜籽油质量安全性评估[J].农产品质量与安全,2016(1):41-46.
- [21] 张守文,呼世斌,肖璇,等.油菜对 Cd 污染土壤的植物修复[J].西北农业学报,2009,18(4):197-201.
- [11] 万勤,孟优,谢新辉,等.新疆生产建设兵团生态系统服务价值时空分异特征[J].生态学报,2014,34(23):7057-7066.
- [12] 任志远,张艳芳.土地利用变化与生态安全评价[M].北京:科学出版社,2013:27-29.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 段瑞娟,郝晋珉,王静.土地利用结构与生态系统服务功能价值变化研究:以山西省大同市为例[J].生态经济,2005(3):60-62,64.

(上接第 73 页)

- [7] 封建民,文琦,郭玲霞.风沙过渡区土地利用变化对生态系统服务价值的影响:以榆林市为例[J].水土保持研究,2018,25(4):304-308.
- [8] 杨丽文,何秉宇,黄培佑,等.和田河流域天然柽柳灌木林生态价值评估[J].中国沙漠,2005,25(2):268-273.
- [9] 陈超群,吴煜,王健,等.生态输水前后塔里木河干流生态系统服务价值的变化过程[J].中国农村水利水电,2017(9):100-103,108.
- [10] 王燕,高吉喜,王金生,等.新疆国家级自然保护区土地利用变化的生态系统服务价值响应[J].应用生态学报,2014,25(5):1439-1446.