DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.03.028
李文博,姜博文,王晶滢.吉林省西部盐碱地综合开发多情景模拟与水资源效应[J].水土保持学报,2024,38(3):159-167,176.
LI Wenbo, JIANG Bowen, WANG Jingying. Multi-scenario simulation and water resource effects of integrated utilization of saline-alkali land in western Jilin province[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2024,38(3):159-167,176.

吉林省西部盐碱地综合开发多情景模拟与水资源效应

李文博[1,2,3], 姜博文[1], 王晶滢[4]
(1.东北大学文法学院,沈阳 110169;2.辽宁土地利用与保护研究基地,沈阳 110169;
3.辽宁省自然资源土地保护与利用重点实验室,沈阳 110169;4.吉林大学地球科学学院,长春 130061)

摘　要:[**目的**]盐碱地综合开发利用是提高农业生产力、践行大食物观的必然选择。但受限于开发利用模式单一、耗水压力较大,亟待探索多元化治理模式并依据其水资源效应开展优化调控。[**方法**]以吉林省西部地区为研究区,采用 FLUS 模型预测 2030 年盐碱地资源在自然发展、粮食安全、粮饲综合开发和生态安全 4 种情景下的开发利用格局,并对不同情景下的产水量变化进行评估。[**结果**](1)2000—2020 年研究区开发利用盐碱地 1 540.18 km^2,主要被恢复为草地或开垦为耕地,但其中旱地次生退化风险较高。(2)不同情景下盐碱地开发均以耕地利用为主。粮食安全情景下水田和旱地开垦面积占比分别为 67.48%,4.23%。相较于自然发展情景,粮饲综合开发情景下盐碱地恢复为草地的面积增加 139.18 km^2,生态安全情景下生态用地规模显著提高。(3)至 2030 年,4 种发展情景下研究区产水量较基期均有所下降,生态安全情景下降幅度最大,达到 3.71×10^8 m^3。相比之下,粮饲综合开发情景充分保障粮食和饲草生产,同时缓和盐碱地治理所导致的水资源压力。[**结论**]松嫩平原盐碱地开发利用应充分考虑粮饲综合开发模式,统筹粮食和饲草供应,协调粮食和生态安全,以大食物观引领国土空间生态修复和退化土地的开发利用。

关键词:盐碱地;综合开发;多情景模拟;产水量;吉林西部
中图分类号:X171.1;S287　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1009-2242-(2024)03-0159-09

Multi-scenario Simulation and Water Resource Effects of Integrated Utilization of Saline-alkali Land in Western Jilin Province

LI Wenbo[1,2,3], JIANG Bowen[1], WANG Jingying[4]
(1. *School of Humanities and Law*, *Northeastern University*, *Shenyang* 110169, *China*;
2. *Research Base of Land Use and Protection of Liaoning Province*, *Shenyang* 110169, *China*;
3. *Key Laboratory of Land Protection and Use*, *Department of Natural Resources of Liaoning Prorince*, *Shenyang* 110169, *China*; 4. *College of Earth Sciences*, *Jilin University*, *Changchun* 130061, *China*)

Abstract:[**Objective**] The integrated utilization of saline-alkali land remains a quintessential stratagem to enhance grain yield whilst embracing the principle of Greater Food. The current simplistic reclamation approaches and the intensive water demands, however, call for a thorough investigation of diversified management strategies and interventions that take into account the impact on water resources. [**Methods**] The study selected the western part of Jilin province as the study area and adopted the FLUS model to forecast the utilization patterns of saline-alkali land resources until 2030 under four scenarios: Natural progression, grain security, integration of grain and forage production, and ecological protection. The InVEST model was then applied to evaluate the variations in water yield across these scenarios. [**Results**] (1) From 2000 to 2020, 1 540.18 km^2 of saline-alkali land in the study area was put to use, predominantly restored to grassland or reclaimed as cultivated land, with a substantial risk of secondary salinization in drylands. (2) Under all scenarios, the reclamation of saline-alkali land for agriculture prevailed. In the grain

收稿日期:2023-11-11　**修回日期:**2023-12-21　**录用日期:**2024-01-27　**网络首发日期(**www.cnki.net**):**2024-04-11
资助项目:国家自然科学基金项目(42001223);中央高校基本科研业务专项(N232405-24)
第一作者:李文博(1990—),男,吉林长春人,副教授,博士,博士生导师,主要从事耕地利用与保护研究。E-mail:liwb@wfxy.neu.edu.cn
通信作者:李文博(1990—),男,吉林长春人,副教授,博士,博士生导师,主要从事耕地利用与保护研究。E-mail:liwb@wfxy.neu.edu.cn

security scenario, the paddy fields and drylands accounted for 67.48% and 4.23%, respectively. When compared with the natural progression scenario, the grassland area was set to expand by 139.18 km^2 in the integration of grain and forage production scenario, and ecological land would increase substantially under the ecological protection scenario. (3) By 2030, water yield is projected to decrease in all four scenarios relative to the baseline period, with the ecological protection scenario facing the steepest reduction at 3.71×10^8 m^3. Conversely, the integration of grain and forage scenario offered a well-balanced solution, ensuring the output of crops and forage while easing the water pressures initiated by the management of saline-alkali land. [**Conclusion**] Utilization of saline-alkali land in the Songnen Plain requires a balanced and strategic approach that supports both grain and forage production. Efforts should be made on maintaining the equilibrium between the supply of agricultural and fodder resources whilst ensuring food and ecological security. The overarching goal is to regulate the ecological restoration of our territorial space and utilization of degraded lands following the concept of Greater Food.

Keywords: saline-alkali land; integrated utilization; multi-scenario simulation; water production; western Jilin

Received: 2023-11-11 **Revised**: 2023-12-21 **Accepted**: 2024-01-27 **Online**(www.cnki.net): 2024-04-11

自我国实施耕地占补平衡制度以来,东北地区耕地后备资源被迅速开垦,规模以每年超10%的速率递减[1]。限制条件较少的宜耕土地几乎开垦殆尽,对落实新时代耕地资源进出平衡政策形成挑战。随着沙漠土壤化、抗逆性育种等农业技术发展,向退化土地要食物已成为拓展农业生产空间的必然选择[2]。2023年7月,中央财经委员会第二次会议强调要充分挖掘盐碱地综合利用潜力,提高农业综合生产力。盐碱地作为松嫩平原重要的耕地后备资源,其总量高达2.55×10^4 km^2,开发潜力巨大[3],是保障东北地区农业产能的重要"蓄水池"。但由于松嫩平原西部地区气候干旱、少雨、多风,水资源相对短缺,如盲目开垦、引水种稻洗盐极易破坏当地水土资源平衡。因此,亟需对未来不同开发情景下的潜在水资源效应进行科学评估,以适应"有序开发、分类改造"的盐碱地治理新要求,做好资源可持续利用的顶层设计。

盐碱地资源综合开发利用的首要步骤是开展潜力评估,基于土壤、光温等因素评价盐碱地的宜耕性和改造后的生产潜力,旨在研判盐碱地开发利用的社会经济效益[4]。其次,盐碱地开发利用需要依托生物措施和工程措施改良土壤条件。其中,生物措施包括种植耐盐碱作物[5]、覆盖生物炭[6]、秸秆还田[7]等,工程措施包括农田灌排系统优化[8]、淋盐洗碱[9]等。此外,盐碱地资源综合开发利用还包括后续的效果评价,基于景观生态学、生态经济学视角评估可能造成的潜在生态效应,为改良应对措施提供依据[10-11]。综上,盐碱地开发仍以耕地利用为主,但在"大食物观"引领下宜统筹兼顾多类国土资源,结合中国盐碱地资源分布特征,其综合开发利用应综合考量粮饲需求。盐碱地开发效应评估研究[12]表明,耗水量增加、水体污染及由此导致的土壤次生盐碱化是不合理开发利用的主要生态负效应。虽已有学者[13]关注区域水土资源错配问题,仍需要对未来盐碱地综合开发利用的水资源效应开展定量研究,以建立科学合理的利用优先序、改良开发利用模式。

吉林省西部是松嫩平原盐碱地资源分布的核心区域。近年来,该地区以用水调配为主要手段充分盘活盐碱地资源,通过引嫩入白、哈达山水利枢纽等水利工程治理盐碱地,已取得一定成效[10]。但多采用物理方式改变地表径流,易造成地下水位上升,加大地下水、地表径流的承载压力[12]。且受当地干旱、少雨等气候条件影响,停灌期蒸发量较大,极易导致土地次生盐碱化[10,13]。鉴于此,以吉林省西部为研究区,在查清吉林省西部2000—2020年盐碱地变化的基础上,采用FLUS模型预测2030年研究区在自然发展、粮食安全、粮饲综合开发、生态安全4种情景下的盐碱地开发格局,并对不同开发利用情景下的水资源效应进行评估,旨在为优化盐碱地治理与综合开发利用、协调区域水土资源提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

吉林省西部地区(121°38′—126°11′E,43°59′—46°18′N)位于科尔沁草原东部、松嫩平原西南部,总面积43 320 km^2,包括松原和白城2个地级市。研究区西北部、东南部地势较高,中部地势低,以平原为主,海拔为100~639 m。年平均气温4~5 ℃,年平

均降水量约 450 mm，年平均蒸发量 1 800 mm，是我国典型的半干旱和半湿润区的过渡带、农牧交错带和生态脆弱带[10]。土壤类型以黑土、草甸土、黑钙土、盐碱土和风沙土为主，受自然和人类活动双重因素影响，土地盐碱化、草场退化、土壤沙化等生态问题严重，已成为限制区域可持续发展的主要瓶颈(图 1)。

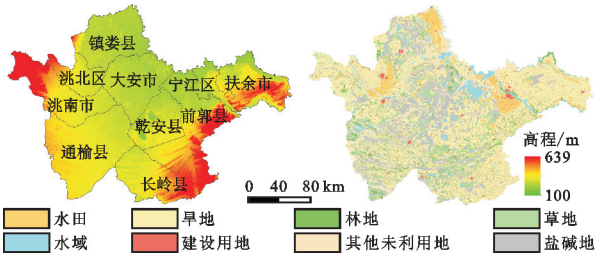


图 1　研究区位置及 2020 年土地利用现状

Fig. 1　Location of the study area and current land use in 2020

1.2　数据来源

研究数据主要包括土地利用、自然地理条件、社会经济条件 3 种类型的基础数据。其中，土地利用数据包括 2000 年、2010 年和 2020 年 3 期，土地利用类型主要划分为耕地(水田、旱地)、林地、草地、水域、建设用地、盐碱地和其他未利用地；自然地理数据主要包括高程、年平均气温、年平均降水量等；社会经济数据主要包括人口分布、GDP 等。数据空间分辨率及来源等相关信息见表 1。

1.3　研究方法

1.3.1　情景模式设定　根据前人[14-17]研究结果及吉林省西部地区的区域发展规划，设定 4 种盐碱地综合开发利用情景，各情景发展目标和转换概率约束条件设置见表 2。其中，自然发展情景为符合研究区历史变化规律的情景模式；粮食安全情景以粮食稳产增产为主要目标，适当调增区域内耕地面积；生态安全情景注重盐碱地综合开发利用后的区域生态系统服务功能，相应增加向林地、水域等重要生态用地的转换概率；粮饲综合开发情景以“大食物观”为引领，综合考量盐碱地开发在粮食、饲草生产中的贡献，参考吉林省耕地后备资源综合开发利用政策、林草发展规划等设定内涵及约束条件[18-19]。

表 1　研究基础数据来源

Table 1　Basic data sources in the present study

数据类型	数据名称	空间分辨率	数据来源
土地利用数据	土地利用分布	30 m×30 m	中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)
自然地理数据	高程	90 m×90 m	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)
	坡度、坡向	90 m×90 m	获取自高程数据计算结果
	年平均气温	1 km×1 km	中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)
	年平均降水量	1 km×1 km	
	归一化植被指数	1 km×1 km	
	年蒸发量	1 km×1 km	
	河流、流域	—	
	土壤属性	1 km×1 km	国家青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn/)
社会经济数据	人口分布	1 km×1 km	中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)
	GDP	1 km×1 km	
	城镇、县市	—	全国地理信息资源目录服务系统(https://www.webmap.cn/)
	公路、铁路	—	
	水库及引水工程	—	吉林水文信息网(https://www.hydrojl.net/)
	水资源现状	—	吉林省水利厅(http://slt.jl.gov.cn/)

注：其中—表示矢量数据。

1.3.2　FLUS 模型　FLUS 模型在元胞自动机(CA)的基础上进行改进，能够更为精确地模拟多种因素影响下的土地利用变化情况[14]。该模型基于神经网络算法(ANN)，根据基期土地利用数据和各驱动因子数据，估算各用地类型的适宜性概率；继而利用适宜性概率、领域因子、惯性系数和转化成本，估算未来土地利用变化的总体概率；最终，基于轮盘赌选择的自适应惯性竞争机制决定栅格单元是否发生土地利用转移[14-15,20-21]。计算公式为：

$$TP^{t}_{p,k} = P_{p,k} \times \Omega^{t}_{p,k} \times \mathrm{Inertia}^{t}_{k} \times (1 - sc_{c\to k}) \tag{1}$$

$$\Omega^{t}_{p,k} = \frac{\sum_{N\times N} \mathrm{con}(c_p^{t-1} = k)}{N \times N - 1} \times W_k \tag{2}$$

$$\mathrm{Inertia}^{t-1}_{k} = \begin{cases} \mathrm{Inertia}^{t-1}_{k} \times \dfrac{D^{t-2}_{k}}{D^{t-1}_{k}} & D^{t-1}_{k} < D^{t-2}_{k} < 0 \\ \mathrm{Inertia}^{t-1}_{k} & |D^{t-2}_{k}| \leqslant |D^{t-1}_{k}| \\ \mathrm{Inertia}^{t-1}_{k} \times \dfrac{D^{t-1}_{k}}{D^{t-2}_{k}} & 0 < D^{t-2}_{k} < D^{t-1}_{k} \end{cases} \tag{3}$$

式中：$TP^{t}_{p,k}$ 为像元 p 发生转变的组合概率；$P_{p,k}$ 为第 k 种地类在像元 p 上的适宜性概率；$\mathrm{Inertia}^{t}_{k}$ 为第 k 种

地类在 t 时刻的自适应惯性系数；$sc_{c\to k}$ 为地类 c 转为地类 k 的转化成本；$\Omega^t_{p,k}$ 为像元 p 在 t 时刻的邻域影响因子；$\sum_{N\times N}\mathrm{con}(c_p^{t-1}=k)$ 表示在 $N\times N$ 的窗口中，第 k 种用地类型在上轮迭代结束后的栅格总数；D_k^{t-1}、D_k^{t-2} 分别为 $t-1$、$t-2$ 时刻第 k 种地类的栅格数与需求数之差；W_k 为各用地类型邻域作用的参数。

表 2 情景模式设定

Table 2 Scenario settings

情景	发展目标	转换概率设定
自然发展情景	该情景基于研究区 2000—2020 年土地利用变化趋势及历史驱动因子，保持各用地类型原有转换概率，是设置其他发展情景的基础	以 Markov 链预测的土地利用需求量作为 FLUS 模型参数，基于历史演变规律模拟 2030 年土地利用格局[14]
粮食安全情景	该情景将维护粮食安全作为首要发展目标。严格落实耕地保护制度，强化控制非农建设用地占用，重视对盐碱地的开垦，有序调增耕地面积	将耕地向其他用地类型转换的概率降低 60%，盐碱地和其他未利用地向耕地转换的概率提高 40%[14-15]
粮饲综合开发情景	该情景以“大食物观”统筹盐碱地资源开发利用。在保证耕地面积相对稳定的基础上，注重饲草生产，有序、适度推进“粮草兼顾”的治理结构	将耕地、草地向其他用地类型转换的概率降低 50%，盐碱地和其他未利用地向耕地、草地转换的概率提高 40%[16-17]
生态安全情景	依据国土空间生态修复要求，重视吉林省西部地区林地、草地、湿地等重要生态用地的严格管控和系统治理，铸牢国土空间生态安全屏障，提高生态系统的完整性和整体性	限制水域转换，林地、草地向其他用地类型转换的概率降低 50%，耕地向建设用地转换概率降低 30%，盐碱地和其他未利用地向林地、草地、水域转换的概率分别提高 40%，30%，30%[14-15,17]

筛选驱动土地利用变化的因素包括自然因素（高程、坡度、坡向、年平均气温、年均降水量、植被覆盖度、土壤 pH、距河流的距离）和社会经济因素（人口分布、GDP、距县市、城镇、公路、铁路的距离）。根据研究区资源禀赋及前人[16,21]研究进行多次调试，将水田、旱地、林地、草地、水域、建设用地、盐碱地、其他未利用地的邻域权重分别设置为 0.3，0.2，0.4，0.3，0.4，1，0.2，0.2。

利用 Kappa 系数检验模拟结果与实际情况的一致程度。若 Kappa 系数>0.75，说明预测结果准确度较高[15,21]。将 2020 年土地利用预测数据与实际数据进行一致性检验，计算得出 Kappa 系数为 0.87，说明利用 FLUS 模型的预测结果可满足精度需求。

1.3.3 产水量模型 运用 InVEST 模型中的产水量模块分析研究区盐碱地综合开发利用后的水资源效应。该模型基于水量平衡方程和 Budyko 水热耦合公式[22-24]，在不考虑地下水影响的条件下，模拟区域内的地表产水量。计算公式为：

$$Y(x)=\left[1-\frac{\mathrm{AET}(x)}{P(x)}\right]\times P(x) \tag{4}$$

式中：$Y(x)$ 为栅格 x 的年产水量（mm）；$\mathrm{AET}(x)$ 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）；$\mathrm{AET}(x)$ 与 $P(x)$ 的比值为土地覆被类型对应的植物蒸散量，计算公式为

$$\frac{\mathrm{AET}(x)}{P(x)}=\frac{1+\omega(x)+R(x)}{1+\omega(x)\times R(x)+\dfrac{1}{R(x)}} \tag{5}$$

$$\omega(x)=Z\times\frac{\mathrm{PAWC}(x)}{P(x)} \tag{6}$$

$$R(x)=\frac{k(x)\times ET_0}{P(x)} \tag{7}$$

式中：$\omega(x)$ 为栅格 x 可利用水量与预期降水量的比值；$\mathrm{PAWC}(x)$ 为栅格 x 可利用含水量；$R(x)$ 为栅格 x 潜在蒸散发与降水量的比值；$k(x)$ 为栅格 x 的蒸散系数；ET_0 为年均蒸散量；Z 为 Zhang 系数，表示降水的季节性特征。对 Z 进行多次校验，当 $Z=9.5$ 时，模型模拟的 2020 年产水量结果与实际产水量[25]的误差仅为 3.24%，模型预测精度可接受。

2 结果与分析

2.1 2000—2020 年研究区盐碱地扩张缩减格局及其开发利用

2020 年吉林省西部盐碱地面积为 7 268.90 km²，多呈点状和条带状分布于通榆县、大安市等研究区中南部地区（图 2）。

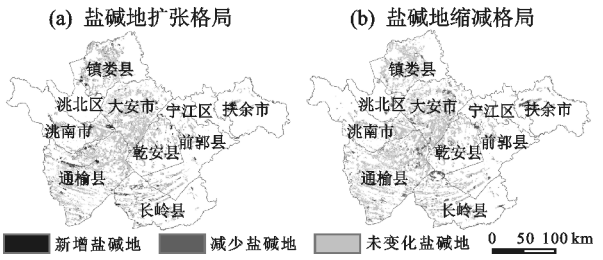


图 2 2000—2020 年吉林省西部盐碱地扩张和缩减格局

Fig. 2 Expansion and shrinking pattern of saline－alkali land in western Jilin Province from 2000 to 2020

2000—2020 年，研究区共开发利用盐碱地 1 540.18 km²，总规模减小 506.90 km²。其中，通榆县开发利用盐碱地 409.65 km²，占总开发面积的 26.60%，宁江区、洮北区盐碱地开发利用规模相对较小（表 3）。缩减的盐碱地主要被恢复为草地或开垦为耕地（图 3），分别占总开发面积的 36.01%，33.80%。其中，开垦为旱地的面积占开垦规模的70.94%，是盐碱地开发利用的主要途径。盐碱地恢复为草地的开发利用模式主要分布于通榆县、长岭县等研究区中南部地区，耕地开垦活动则集中在通榆县、大安市等研究区东南部地区。此外，2000—2020 年部分地区盐碱地存在扩张现象，规模达 1 033.05 km²，占 2020 年盐碱地面积的 14.21%，主要分布在通榆县、镇赉县、长岭县等地。扩张来源主要为草地和旱地，分别占总扩张面积的 42.82%，22.16%，说明研究区在开发利用盐碱地资源的过程中伴随着土地次生盐碱化现象，仍需进一步根据区域水资源的空间格局合理规划盐碱地治理和开发利用工程。

2.2　研究区 2030 年多情景盐碱地综合开发利用模拟

预测 2030 年研究区 4 类发展情景下的土地利用情况，各类情景下土地利用结构基本稳定，盐碱地开垦为耕地的开发利用模式分布相对广泛（表 4）。在自然发展情景下，至 2030 年将有 549.96 km²的盐碱地开垦为耕地，区域内耕地总面积将增加 321.10 km²。其中，转水田的面积比率将达到 67.61%，为盐碱地开发利用的主要模式，旱地开垦面积和总面积均减少。同时，将有 166.41 km²的土地退化为盐碱地，主要退化来源为研究区的旱地，占总退化面积的 61.13%，主要分布于大安市、通榆县等研究区西南部地区（图 4a），说明自然演替规律下，旱地的次生退化现象较为严重。

表 3　2000—2020 年吉林省西部各区县盐碱地开发利用情况

Table 3　County－level utilization of saline－alkali land in western Jilin Province from 2000 to 2020　　km²

县级单位		水田	旱地	林地	草地	水域	建设用地	盐碱地	其他未利用地
松原市	扶余市	42.45	35.50	1.14	43.84	0.26	1.96	134.84	1.93
	宁江区	0.96	3.78	0.07	0.01	0.07	9.11	15.63	0
	前郭县	10.18	12.70	0.95	66.94	3.69	5.54	439.47	9.59
	乾安县	0.62	13.77	2.14	38.35	34.06	5.23	559.93	4.66
	长岭县	15.86	58.55	10.81	116.83	18.97	12.80	648.95	14.66
	大安市	38.48	41.49	76.72	41.72	33.33	15.15	1 317.21	22.26
白城市	洮北区	28.25	9.36	0.88	23.33	0.59	0.20	22.04	2.74
	洮南市	7.54	28.22	3.33	29.66	6.10	5.41	461.30	8.92
	通榆县	0	145.31	15.00	159.81	21.00	24.12	1 839.30	44.41
	镇赉县	6.94	20.67	1.21	34.07	14.67	15.48	796.72	15.83
总计		151.28	369.35	112.25	554.56	132.74	95.00	6 235.39	125.00

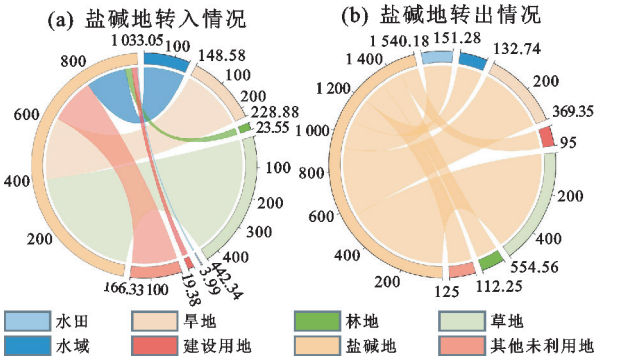


图 3　2000—2020 年吉林省西部盐碱地转入转出情况

Fig. 3　The conversion of saline－alkali land in western Jilin Province from 2000 to 2020

粮食安全情景下，研究区耕地总面积较自然发展情景增加 591.72 km²，有利于稳定和提高区域粮食产量。新增耕地面积主要来源为盐碱地和其他未利用地，占比分别为 49.21%，33.72%，且均以转水田为主，主要分布于镇赉县、扶余市等研究区北部和东部地区（图 4b）。此外，盐碱地转为林地和水域的面积较自然发展情景有所减少，区域内林地、草地、水域总面积将分别下降 230.52，64.38，21.74 km²，生态用地面积呈缩减趋势。粮饲综合开发情景下，盐碱地开垦为耕地的面积与粮食安全情景相比减少 35.90 km²，恢复为草地的面积增加 60.76 km²。同时，盐碱地转为林地和水域的面积较粮食安全情景分别增加 21.46，2.68 km²，林地总面积将增加 15.37 km²，保持一定规模的生态用地，且建设用地扩张幅度较小，对于进一步提高饲草产能、优化粮饲结构、统筹粮食安全和生态安全等方面具有重要意义（图 4c）。生态安全情景下，研究区耕地总面积最小，为 25 614.47 km²，对粮食产能贡献度较小。但盐碱地转变为林地、草地、水域的面积与自然发展情景相比分别增加 7.26，164.01，84.72 km²，总面积较 2020 年分别提高 13.86%，6.38%，9.01%，为吉林省西部地区提供更丰富的生态资源保障（图 4d）。

表 4 2030 年不同情景下吉林省西部地区盐碱地开发利用情况

Table 4 Utilization of saline－alkali land in western Jilin Province under different scenarios in 2030 km²

发展情景	转换类型							
	水田	旱地	林地	草地	水域	建设用地	盐碱地	其他未利用地
自然发展情景	430.87	119.09	18.65	16.61	11.89	4.76	6 631.70	35.45
粮食安全情景	437.87	27.46	18.03	95.03	1.70	13.01	6 620.11	55.81
粮饲综合开发情景	426.77	2.66	39.49	155.79	4.38	10.62	6 391.54	237.77
生态安全情景	390.02	156.83	25.91	180.62	96.61	0.65	6 237.70	180.68

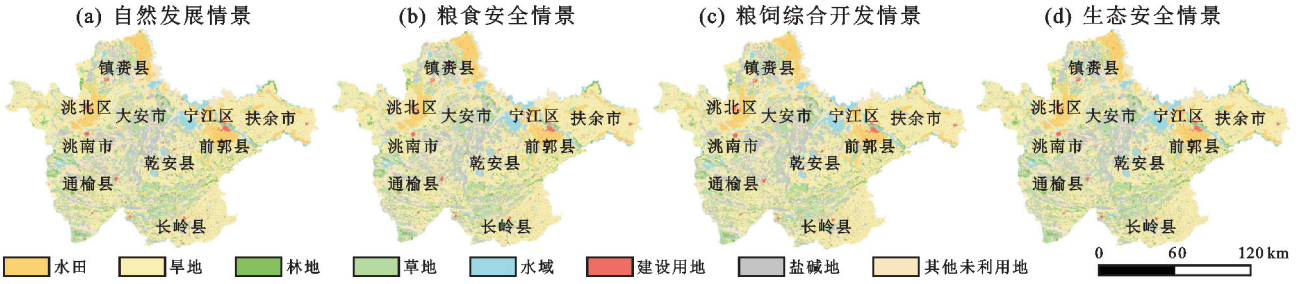


图 4 2030 年吉林省西部地区盐碱地综合开发利用多情景模拟结果

Fig. 4 Multi-scenario simulation results of utilizing saline-alkali land in western Jilin Province in 2030

2.3 不同盐碱地开发利用情景下的水资源效应

由表 5、图 5 可知，与 2020 年相比，不同发展情景下的产水量格局基本稳定，大安市、乾安县等研究区中部地区产水量较高，扶余市、洮北区等东西部地区产水量相对较低，镇赉县、前郭县等地变化显著。研究区产水量变化与土地利用格局变化密切相关。其中，建设用地多为不透水层，蒸散量相对较小，降水量转为产水量的比例更高。在自然发展情景下，研究区建设用地扩张显著，产水量相较于基期下降幅度最小，为 2.45×10^8 m³。而在生态安全情景下，林地、草地等蒸散量相对更大的生态用地面积显著增加，产水量下降幅度最大，达到 3.71×10^8 m³，说明盲目将盐碱地恢复为生态用地可能加剧水土资源错配问题。但长期来看，生态用地面积的增加有利于促进水源涵养和水土保持。因此，在盐碱地综合开发利用过程中，应根据地区水资源禀赋特征，保持并有序增加一定规模的生态用地，进一步巩固国土空间生态安全屏障。粮饲综合开发情景下，产水量与粮食安全情景相比虽有所下降，但高于生态安全情景，说明粮饲综合开发情景在维持一定规模生态用地的同时，区域产水量变化相对较小，能够更好地统筹农业生产和生态安全维护。

表 5 不同开发利用情景下吉林省西部各区县产水总量及较 2020 年变化量

Table 5 County－level water yield and changes since 2020 in western Jilin Province under different utilization scenarios

×10⁸ m³

县级单位		自然发展情景		粮食安全情景		粮饲综合开发情景		生态安全情景	
		产水总量	变化量	产水总量	变化量	产水总量	变化量	产水总量	变化量
松原市	扶余市	5.13	－0.57	5.05	－0.65	5.07	－0.63	5.10	－0.60
	宁江区	2.15	－0.06	2.14	－0.07	2.14	－0.07	2.09	－0.12
	前郭县	4.76	－0.71	4.75	－0.72	4.71	－0.76	4.67	－0.80
	乾安县	5.73	－0.08	5.74	－0.07	5.71	－0.10	5.59	－0.22
	长岭县	4.58	－0.03	4.59	－0.02	4.56	－0.05	4.53	－0.08
白城市	大安市	11.29	－0.08	11.22	－0.14	11.02	－0.33	11.04	－0.32
	洮北区	1.76	－0.11	1.74	－0.13	1.75	－0.12	1.77	－0.10
	洮南市	5.63	－0.04	5.61	－0.06	5.55	－0.13	5.56	－0.11
	通榆县	10.27	0	10.27	0	10.02	－0.25	10.05	－0.22
	镇赉县	7.71	－0.77	7.20	－1.29	7.33	－1.16	7.35	－1.14
总计		59.01	－2.45	58.31	－3.15	57.86	－3.60	57.75	－3.71

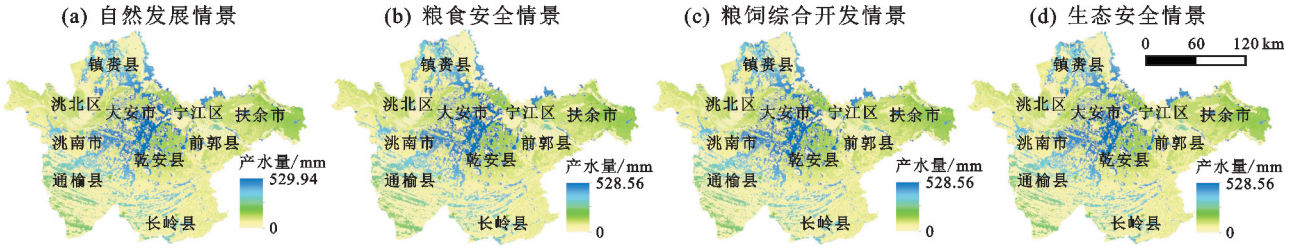
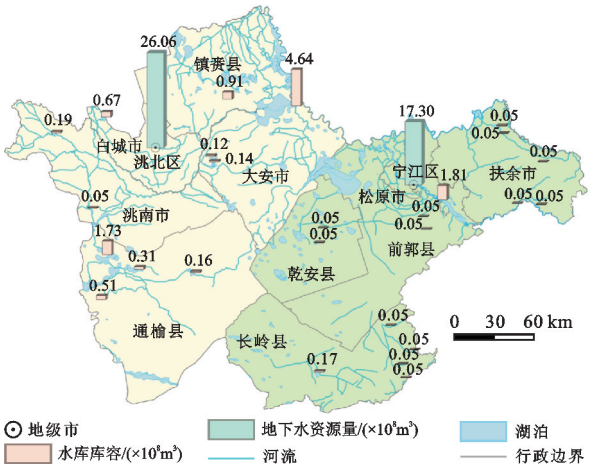


图 5　不同开发利用情景下吉林省西部产水量分布格局

Fig. 5　Distribution pattern of water yield in western Jilin Province under different scenarios

结合吉林省西部地区水资源禀赋、水库分布情况(图 6)及“引嫩入白”“引霍入向”“引洮入向”等引水工程实施状况，以汛限水位对应的库容为参考，扶余市、前郭县的水库蓄水量均小于 4 种发展情景下的产水量减少量，且生态安全情景下的缺水程度更为严重。其他区域内的水库蓄水量虽高于产水量减少幅度，但若盲目将盐碱地大规模开垦为耕地或恢复为生态用地，将导致产水量进一步下降，甚至超出水利工程可提供的水资源总量，加大区域用水压力。在未来发展过程中，应根据区域内水资源总量，合理控制盐碱地开发规模，有序、合理推进林地等各类生态用地开发，逐步发挥其水源涵养功能，尽量避免生态用地短时期内大规模增加导致的水资源耗竭风险，维护区域内水土平衡和生态安全，促进区域生态系统稳定和可持续发展。



注：因部分小型水库的库容数据缺失，根据水库划分标准，将该部分水库的汛限水位对应的库容设置为 0.05×10^8 m^3；地下水资源量数据以地级市为统计单元[26]。

图 6　吉林省西部水资源及水库分布

Fig. 6　Water resource and reservoir distribution in western Jilin Province

3　讨 论

随着国民社会经济的发展，我国居民饮食结构不断优化，口粮消费量占粮食总消费量比重下降，用于生产肉禽蛋奶及水产品的饲料需求不断增长[27]。以“大食物观”统筹粮、经、饲结构，将粮食安全内涵扩大到食物安全，是适应城乡居民食物消费升级的必然选择[28]。吉林省西部地区分布有大量的天然草地，但近年来，在农牧活动影响下，土地“三化”问题愈发严重。如盲目采用引水洗地等工程措施，以补充耕地数量为目标开垦盐碱地资源，极易发生次生土地退化问题[12]。根据盐碱地形成特点及区域气候条件，可充分考虑恢复草地植被的可行性，将“饲草就是粮食”理念融入盐碱地综合开发治理，创新以草增粮、以草节粮、以草代粮的可行途径[4,29]。同时，综合考量盐碱地开发的水资源效应，充分协调松嫩平原干旱区的粮食安全和生态安全。

对不同情景下的盐碱地开发利用进行多情景模拟，其中，粮饲综合开发情景优势明显。与自然发展情景相比，粮饲综合开发情景下的耕地和草地总面积分别增加 388.00，281.50 km^2。虽然与粮食安全情景相比，该情景下盐碱地开垦为耕地的规模减小，但盐碱地恢复为草地的面积增加 60.76 km^2，草地总面积将增加 345.88 km^2，有利于提高饲草产能。同时，盐碱地转为林地和水域的面积在此基础上增加 21.46 和 2.68 km^2，区域内林地总面积将增加 15.37 km^2，充分保障生态用地资源，对维持区域内水源涵养等重要生态功能和促进农业系统的可持续发展具有意义。此外，在生态安全情景下，生态用地面积急剧扩张，需要布局大量引水工程，而粮饲综合开发情景下的水土资源错配风险相对较小。因此，在未来盐碱地综合开发利用的过程中，应根据水资源禀赋特征及农业水利设施的灌溉潜力上限，合理确定盐碱地开发规模、时序和类型。根据城乡居民食物消费结构优化盐碱地开发利用中的粮饲结构，统筹区域内水田、旱地和草地资源，并注重生态用地的长期水源涵养作用。

4　结 论

(1)2000—2020 年，吉林省西部地区开发利用盐碱地 1 540.18 km^2，集中分布于通榆县等地。盐碱地资源主要被恢复为草地或开垦为耕地，分别占总开发面积的 36.01%和 33.80%。同时，研究区新增盐碱地 1 033.05 km^2，主要退化自草地和旱地，在开发利用

过程中仍需注重次生退化风险、稳固治理成效。

(2)2030年,自然发展情景下盐碱地开垦为水田的比率达67.61%,开发利用模式相对单一;粮食安全情景下耕地总面积最大,但各类生态用地规模显著减少;粮饲综合开发情景下盐碱地恢复为草地的面积较粮食安全情景增加60.76 km^2,有利于协调粮食和饲草产能,并在一定程度上保障生态用地资源;生态安全情景下林地、水域等生态用地面积大幅度提高,但耕地总面积最小,为25 614.47 km^2。

(3)4种发展情景下研究区产水量较基期均有所下降,其中,自然发展情景下产水量下降幅度最小,为2.45×10^8 m^3。生态安全情景下降幅度最大,达到3.71×10^8 m^3,该类盐碱地开发利用模式依赖于引水工程补给水源,生态用地激增将进一步加大区域用水压力。而粮饲综合开发情景下产水量下降幅度较小,不仅优化粮饲结构,更充分权衡粮食安全和生态安全。

参考文献:

[1] 易玲,张增祥,汪潇,等.近30年中国主要耕地后备资源的时空变化[J].农业工程学报,2013,29(6):1-12,293.
YI L, ZHANG Z X, WANG X, et al. Spatial-temporal change of major reserve resources of cultivated land in China in recent 30 years[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2013,29(6):1-12,293.

[2] 曹晓风,孙波,陈化榜,等.我国边际土地产能扩增和生态效益提升的途径与研究进展[J].中国科学院院刊,2021,36(3):336-348.
CAO X F, SUN B, CHEN H B, et al. Approaches and research progresses of marginal land productivity expansion and ecological benefit improvement in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2021,36(3):336-348.

[3] 姚东恒,廖宇波,孔祥斌,等.基于"三层"融合的松嫩平原盐碱地资源特征[J].农业工程学报,2022,38(23):247-257.
YAO D H, LIAO Y B, KONG X B, et al. Characteristics of saline-alkali land and resources based on three-layer fusion of saline-alkali soil in Songnen Plain of China[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2022,38(23):247-257.

[4] 张红旗,王立新,孙广友,等.松嫩低平原盐碱地资源评价及开发潜力研究[J].中国农业资源与区划,2013,34(2):6-11.
ZHANG H Q, WANG L X, SUN G Y, et al. Evaluation of saline-alkali land resource and development potential in low Songnen Plains[J].Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2013, 34(2):6-11.

[5] 杜艺,张玉林,张志浩,等.种植7种牧草对北疆盐碱地土壤改良效果的评价[J].草业科学,2023,40(5):1210-1219.
DU Y, ZHANG Y L, ZHANG Z H, et al. Soil improvement effect of planting seven gramineous plants in saline-alkali soil in the northern Xinjiang[J].Pratacultural Science,2023,40(5):1210-1219.

[6] 刘淼,王志春,杨福,等.生物炭在盐碱地改良中的应用进展[J].水土保持学报,2021,35(3):1-8.
LIU M, WANG Z C, YANG F, et al. Application progress of biochar in amelioration of saline-alkaline soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(3):1-8.

[7] 张婧,陈庆锋,刘伟,等.秸秆还田对盐碱地土壤及作物生长的影响研究进展[J].江苏农业科学,2022,50(11):13-22.
ZHANG J, CHEN Q F, LIU W, et al. Research progress on the effects of straw returning on soil and crop growth in saline-alkali soil[J].Jiangsu Agricultural Sciences,2022,50(11):13-22.

[8] 耿其明,闫慧慧,杨金泽,等.明沟与暗管排水工程对盐碱地开发的土壤改良效果评价[J].土壤通报,2019,50(3):617-624.
GENG Q M, YAN H H, YANG J Z, et al. Evaluation for soil improvement effect of open ditch and concealed drainage engineering on saline alkali land development[J]. Chinese Journal of Soil Science,2019,50(3):617-624.

[9] 韩冬,姚宇阗,陈超,等.向日葵种植和灌排淋洗改良滨海盐碱地的协同效应研究[J].节水灌溉,2023(7):90-95,109.
HAN D, YAO Y T, CHEN C, et al. Evaluation on the synergistic effect of sunflower and subsurface drainage on reducing salinity in coastal saline alkali land[J].Water Saving Irrigation,2023(7):90-95,109.

[10] 王晶滢,王冬艳,杨月稳.吉林西部盐碱地开发利用生态效应及格局优化:以吉林省白城市镇赉县为例[J].资源开发与市场,2021,37(5):532-538.
WANG J Y, WANG D Y, YANG Y W. Ecological effects and pattern optimization of the reclamation of saline-alkali land in west Jilin: A case study in Zhenlai county of Baicheng city in Jilin province[J]. Resource Development and Market,2021,37(5):532-538.

[11] XIN B X, YU L X, LI G S, et al. Impact of saline-alkali land greening on the local surface temperature: A multi-scale assessment based on remote sensing[J]. Remote Sensing,2022,14(17):e4246.

[12] 孙广友,王海霞.松嫩平原盐碱地大规模开发的前期研究、灌区格局与风险控制[J].资源科学,2016,38(3):407-413.

SUN G Y, WANG H X. Large scale development to saline-alkali soil and risk control for the Songnen Plain[J]. Resources Science,2016,38(3):407-413.

[13] 左强,吴训,石建初,等.黄河三角洲滨海盐碱地可持续利用的水土资源约束与均衡配置策略[J].中国工程科学,2023,25(4):169-179.
ZUO Q, WU X, SHI J C, et al. Constraints and coordinated allocation strategies of water and land resources for sustainable use of coastal saline-alkali land in the Yellow River Delta[J].Strategic Study of CAE,2023,25(4):169-179.

[14] 陈理庭,蔡海生,张婷,等.基于 Markov-FLUS 模型的饶河流域土地利用多情景模拟分析[J].生态学报,2022,42(10):3947-3958.
CHEN L T, CAI H S, ZHANG T, et al. Land use multi-scenario simulation analysis of Rao River Basin based on Markov-FLUS model[J]. Acta Ecologica Sinica,2022,42(10):3947-3958.

[15] 张自正,梁思源,熊玉晴.多情景土地利用变化下武汉城市圈生态系统服务权衡协同研究[J].农业资源与环境学报,2023,40(2):345-357.
ZHANG Z Z, LIANG S Y, XIONG Y Q. Ecosystem service tradeoffs in Wuhan metropolitan area under multi-scenario land use change[J].Journal of Agricultural Resources and Environment,2023,40(2):345-357.

[16] 喇蕗梦,勾蒙蒙,李乐,等.三峡库区生态系统服务权衡时空动态与情景模拟:以秭归县为例[J].生态与农村环境学报,2021,37(11):1368-1377.
LA L M, GOU M M, LI L, et al. Spatiotemporal dynamics and scenarios analysis on trade-offs between ecosystem service in Three Gorges Reservoir area: A case study of Zigui county[J].Journal of Ecology and Rural Environment,2021,37(11):1368-1377.

[17] 杨朔,苏昊,赵国平.基于 PLUS 模型的城市生态系统服务价值多情景模拟:以汉中市为例[J].干旱区资源与环境,2022,36(10):86-95.
YANG S, SU H, ZHAO G P. Multi-scenario simulation of urban ecosystem service value based on PLUS model: A case study of Hanzhong city[J].Journal of Arid Land Resources and Environment,2022,36(10):86-95.

[18] 吉林省人民政府办公厅.吉林省人民政府办公厅关于开展盐碱地等耕地后备资源综合利用的指导意见[EB/OL].长春:吉林省人民政府办公厅,[2022-09-21][2023-10-20]. http://zrzy.jl.gov.cn/zwgk/fgwj/gfxwj/bsgfxwj/202209/t20220927_8586546.html.
General Office of Jilin Provincial People's Government. Guiding opinions of the general office of Jilin provincial people's government on the comprehensive utilization of saline-alkali land and other reserve resources of cultivated land[EB/OL]. Changchun: General Office of Jilin Provincial People's Government [2022-09-21][2023-10-20]. http://zrzy.jl.gov.cn/zwgk/fgwj/gfxwj/bsgfxwj/202209/t20220927_8586546.html.

[19] 吉林省林业和草原局.吉林省林业和草原发展"十四五"规划[EB/OL].长春:吉林省林业和草原局,[2021-09-24][2023-10-20]. https://xxgk.jl.gov.cn/zcbm/fgw_98097/xxgkmlqy/202110/P020221017339576771864.pdf.
Jilin Provincial Bureau of Forestry and Grassland. The 14th Five-Year Plan for forestry and grassland development in Jilin province[EB/OL].Changchun:Jilin Provincial Bureau of Forestry and Grassland,[2021-09-24][2023-10-20].https://xxgk.jl.gov.cn/zcbm/fgw_98097/xxgkmlqy/202110/P020221017339576771864.pdf.

[20] 朱从谋,苑韶峰,杨丽霞.耦合 MOP 与 FLUS 模型的杭州市土地利用格局优化及权衡分析[J].农业工程学报,2023,39(16):235-244.
ZHU C M, YUAN S F, YANG L X. Spatial optimization of land use pattern and trade-off analysis in Hangzhou city by coupling MOP and FLUS model[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2023,39(16):235-244.

[21] 高周冰,王晓瑞,隋雪艳,等.基于 FLUS 和 InVEST 模型的南京市生境质量多情景预测[J].农业资源与环境学报,2022,39(5):1001-1013.
GAO Z B, WANG X R, SUI X Y, et al. Multi-scenario prediction of habitat quality in Nanjing based on FLUS and InVEST models[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment,2022,39(5):1001-1013.

[22] 伍堂银,周忠发,张露,等.基于 InVEST 模型的南北盘江流域产水量时空变化研究[J].水土保持通报,2023,43(3):129-138.
WU T Y, ZHOU Z F, ZHANG L, et al. Spatial-temporal variation of water yield in Nanbei panjiang river basin based on InVEST model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2023,43(3):129-138.

[23] ZHANG L, DAWES W R, WALKER G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale[J]. Water Resources Research,2001,37(3):701-708.

[24] 周文佐,刘高焕,潘剑君.土壤有效含水量的经验估算研究:以东北黑土为例[J].干旱区资源与环境,2003,17(4):88-95.
ZHOU W Z, LIU G H, PAN J J. Soil available water capacity and it's empirical and statistical models-with a special reference to black soils in Northeast China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2003,17(4):88-95.

(下转第 176 页)

the Yangtza Basin,2002,11(2):171-174.

[17] 孙荣,袁兴中,刘红,等.三峡水库消落带植物群落组成及物种多样性[J].生态学杂志,2011,30(2):208-214.
SUN R, YUAN X Z, LIU H, et al. Floristic composition and species diversity of plant communities along an environment gradient in drawdown area of Three Gorges Reservoir after its initial impounding to the water level of 156 M[J].Chinese Journal of Ecology,2011,30(2):208-214.

[18] SHENG M H, AI X Y, HUANG B C, et al. Effects of biochar additions on the mechanical stability of soil aggregates and their role in the dynamic renewal of aggregates in slope ecological restoration[J]. Science of the Total Environment,2023,898:e165478.

[19] 张淑娟,贺秀斌,鲍玉海,等.三峡水库消落带不同水位高程土壤团聚体变化特征[J].水土保持研究,2021,28(1):25-30.
ZHANG S J, HE X B, BAO Y H, et al. Change characteristics of soil aggregates at different water levels in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir[J].Research of Soil and Water Conservation,2021,28(1):25-30.

[20] HE X B, BAO Y H, NAN H W, et al. Tillagepedogenesis of purple soils in southwestern China[J].Journal of Mountain Science,2009,6(2):205-210.

[21] 郑晓岚,杨玲,宋娇,等.水库消落带土壤颗粒组成分形及其空间分异特征[J].水土保持研究,2022,29(1):66-71.
ZHENG X L, YANG L, SONG J, et al. Fractal characteristics and spatial variation of soil particle composition in the reservoir riparian zone[J]. Research of Soil and Water Conservation,2022,29(1):66-71.

[22] 饶洁,段丁琪,唐强,等.三峡水库消落带植被高程梯度分异及其对生境胁迫的响应[J].生态学报,2023,43(16):6649-6660.
RAO J, DUAN D Q, TANG Q, et al. Vegetation differentiation along elevation gradient in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir and its response to habitat stressing[J]. Acta Ecologica Sinica,2023,43(16):6649-6660.

[23] 刘艳,马茂华,吴胜军,等.干湿交替下土壤团聚体稳定性研究进展与展望[J].土壤,2018,50(5):853-865.
LIU Y, MA M H, WU S J, et al. Soil aggregates as affected by wetting-drying cycle: A review[J].Soils,2018,50(5):853-865.

[24] YE C, CHEN C R, BUTLER O M, et al. Spatial and temporal dynamics of nutrients in riparian soils after nine years of operation of the Three Gorges Reservoir, China[J]. The Science of the Total Environment,2019,664:841-850.

[25] 张钦弟,刘剑荣,杨磊,等.半干旱黄土区植被恢复对土壤团聚体稳定性及抗侵蚀能力的影响[J].生态学报,2022,42(22):9057-9068.
ZHANG Q D, LIU J R, YANG L, et al. Effect of vegetation restoration on stability and erosion resistance of soil aggregates in semi-arid loess region[J].Acta Ecologica Sinica,2022,42(22):9057-9068.

(上接第167页)

[25] 吉林省水利厅.吉林省水资源公报2020[EB/OL].长春:吉林省水利厅,[2021-10-27][2023-10-20].http://slt.jl.gov.cn/zwgk/szygb/202110/P020211203498418240484.pdf.
Department of Water Resources of Jilin Province. Jilin water resources bulletin 2020[EB/OL].Changchun:Department of Water Resources of Jilin Province,[2021-10-27][2023-10-20].http://slt.jl.gov.cn/zwgk/szygb/202110/P020211203498418240484.pdf.

[26] 吉林省水利厅.吉林省水资源公报2022[EB/OL].长春:吉林省水利厅,[2023-12-12][2023-12-20].http://slt.jl.gov.cn/zwgk/szygb/202312/P020231212317121419223.pdf
Department of Water Resources of Jilin Province. Jilin water resources bulletin 2022[EB/OL].Changchun:Department of Water Resources of Jilin Province,[2023-12-12][2023-12-20].http://slt.jl.gov.cn/zwgk/szygb/202312/P020231212317121419223.pdf.

[27] 胡小平,廖亚君,毛雨.大食物观下我国粮食安全保障重点的研究[J].农村经济,2023(7):55-62.
HU X P, LIAO Y J, MAO Y. Research on the key points of food security in China under the perspective of greater rood[J].Rural Economy,2023(7):55-62.

[28] 周应恒,李娜."大食物观"与我国食物安全保障新思路[J].中国农业大学学报(社会科学版),2023,40(4):147-158.
ZHOU Y H, LI N. All-encompassing approach to food and new thinking of food security[J].Journal of China Agricultural University(Social Sciences),2023,40(4):147-158.

[29] 杨富裕.树立"饲草就是粮食"理念,大力发展饲草产业[J].草地学报,2023,31(2):311-313.
YANG F Y. New concept "forage is a part of grains" to utmost spurring the development of forage industry[J]. Acta Agrestia Sinica,2023,31(2):311-313.