

# 青藏高原高寒草地适应性管理释义：概念及实现途径

杨晓霞<sup>1</sup>, 赵新全<sup>2</sup>, 董全民<sup>1\*</sup>, 俞旸<sup>1</sup>, 刘文亭<sup>1</sup>, 张春平<sup>1</sup>, 曹铨<sup>1</sup>

1. 青海大学畜牧兽医学院, 青海省畜牧兽医学院, 青海省高寒草地适应性管理重点实验室, 西宁 810016;

2. 青海大学省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 西宁 810016

\*联系人, E-mail: [qmdong@qhu.edu.cn](mailto:qmdong@qhu.edu.cn)

适应性管理(adaptive management), 这一概念最初由加拿大生态学家Holling<sup>[1]</sup>在20世纪70年代提出, 最初应用于渔业管理, 后逐渐被其他学科采纳, 如“城市绿色基础设施适应性管理”“人居型世界遗产的适应性管理”和“生态系统适应性管理”等<sup>[2]</sup>。进入21世纪, 草地管理开始引入适应性管理的理念, 如美国南加州草地和澳大利亚东南部袋鼠草原的管理方式正是适应性管理的例子<sup>[3,4]</sup>。在国内, 适应性管理主要集中在理论探讨层面, 在实践中的应用尚属鲜见<sup>[5]</sup>。草地适应性管理的提法最早可以追溯到2004年<sup>[6]</sup>, 随后, 国内发表的研究中, 使用草地适应性管理或者相近的提法逐渐增加<sup>[7]</sup>, 这些研究都提到了草地适应性管理这个术语, 但并未对其给出一个清晰而明确的定义, 这造成了学者在使用这个术语时概念模糊、内涵不清晰。

科学概念是在科学实践中逐步形成和发展起来的, 是人们对研究对象的客观认识, 对于科学的发展具有重要的意义。1985年4月22日, “中国原子弹之父”钱三强在全国自然科学名词审定委员会成立大会开幕词中说到“自然科学名词术语是进行科学技术交流的工具”, 自然科学名词术语不清晰不统一, “给科学技术信息交流、科研、生产、教学工作等带来了有害的影响”。由此可见, 在科学的研究中, 清晰明确的概念是构建一个学科范式的基础。本文基于适应性管理理念, 通过梳理草地管理目标的变迁、20世纪80年代以来青藏高原高寒草地基础理论研究和应用示范研究的成果, 以及近10年来高寒草地管理研究者对适应性管理的探讨<sup>[8-11]</sup>, 尝试定义“高寒草地适应性管理”, 并从现实需求、理论基础和实现途径3个方面对青藏高原高寒草地的适应性管理展开论述, 对高寒草地适应性管理的理论建立和技术应用进行初步探讨, 期望对新时代下高寒草地管理理论和技术的发展起到积极的推动作用。

## 1 草地管理目标的变迁

在人类社会漫长的发展历程中, 草地始终被视为一种“生产资料”, 其核心功能是为家畜和野生动物提供饲草和栖息地, 即草地主要为畜牧业生产服务, 因而人类对于草地的管理, 通常以生产草畜产品为目的, 通过在草地上放牧家畜



**董全民** 博士, 研究员, 青海大学畜牧兽医学院副院长, 三江源区高寒草地生态教育部重点实验室和青海省高寒草地适应性管理重点实验室主任, 中国草学会第十届理事会常务理事、第八届教育部科学技术委员会环境学部委员, 国家林业和草原局林草科技创新团队、青海省“高端创新人才千人计划”培养团队和青海省创新创业团队负责人。研究领域为恢复生态学和放牧生态学。

或者刈割收获饲草进行动物饲养, 以获得肉、奶、毛、皮等畜产品, 因此传统的草地管理突出的是“生产性”目标。在这漫长的历史时期中, 尽管人类并不十分重视草地的生态功能, 然而生产功能和生态功能基本没有出现大的、长期的匮乏情况, 人类需求和草地资源之间存在着微妙的动态平衡。新中国成立后, 受“以粮为纲”思想、工业化、城镇化发展的影响, 草原被不断侵占, 可用面积持续减少。与此同时, 牧区人口数量和牲畜数量持续增加, 以“生产性”目标为导向的草地管理方式造成了草地负荷过度, 加之工业革命以来全球气候变化的影响, 草地退化问题日益突出, 草地的生态服务功能和生产功能持续下降。进入21世纪以来, 我国政府管理部门对草地利用的原则历经了生产为主→生产生态并重→生态优先→生产生态有机结合、生态优先→生态保护优先的逐步转变, 在当今全球变化和人为活动的剧烈影响下, 草地管理面临着新的机遇和挑战。

高寒草地是青藏高原上最主要的生态系统, 既是我国的重要生态屏障和主要生态产品输出供给地, 也是发展区域生态畜牧业的重要生产资料, 是实现青藏高原生态保护和高质量发展的重要基地, 在全国乃至国际生态文明高地建设中具有特殊而重要的地位。然而在全球气候变化和人为因素的影响下, 高寒草地退化现象十分严重。据报道, 在20世纪90年代, 青藏高原退化草地面积约为4251万hm<sup>2</sup>, 占全区可利用草地面积的1/3, 其中黑土滩(极度退化草地)面积为703.19万hm<sup>2</sup>,

占退化草地面积的16.54%<sup>[12]</sup>, 进入21世纪, 这一退化趋势继续增加。近10年来, 随着青藏高原生态安全屏障保护与建设工程的实施, 草地的退化趋势得到了一定遏制, 但是部分草地仍然存在不同程度的退化, 尤其是在干旱以及极端气候频繁发生的年份叠加不适宜的放牧活动, 草地退化进一步加剧。在这些与日俱增的问题面前, 突出“生产性目的”的传统草地管理方式存在着天然的缺陷, 明显制约着草地生态生产功能的发挥, 而且在面对全球气候变化和高强度的人类干扰时缺乏灵活性。如何通过有效管理以减轻全球变化和人类活动对高寒草地的不利影响、扩大有利影响, 实现高寒草地结构与功能持续稳定、草地资源的有效利用、发挥其作为生态屏障和畜牧业基地的重要作用, 是当前高寒草地管理亟须解决的难题。

## 2 高寒草地适应性管理的概念和内涵

### 2.1 高寒草地适应性管理的概念

高寒草地适应性管理, 是基于高寒草地类型及当前状态, 遵循“土壤-植物-生物”系统内各界面的结构、过程以及规律等特征, 充分考虑环境要素(气候变化和人类活动)的复杂性和多变性, 以结构稳定、生态系统服务和功能持续输出, 即高寒草地的可持续发展为目标的动态管理过程(图1)。

### 2.2 高寒草地适应性管理的内涵

根据高寒草地适应性管理的概念, 其内涵包括以下内容。

(1) 认识管理对象。认识管理对象是进行适应性管理的第一步。青藏高原高寒草地生态系统作为一个特定的地理空间单元, 具有特定的结构和功能。生态系统结构表现为内部各

个组分(生产者、消费者、分解者以及非生物环境)之间在连续时空上的排列组合方式、相互作用形式以及相互联系的规则, 功能则是系统在相互作用中所呈现出来的属性。系统内部不同层次的结构和生态学过程决定并制约了系统的功能, 因此对其进行管理, 必须是在遵循系统结构、功能和生态学过程和规律的基础上进行调控。

高寒草地管理目标的实现以其可提供的生态系统功能为前提, 管理措施要顺应草地当前的状态。如, 健康状态下的高寒草地, 应当以科学合理利用为原则, 优化放牧管理方式, 提升利用水平, 维持草地结构和功能持续稳定, 充分发挥高寒草地的资源效力; 退化状态下的高寒草地, 则应当明晰退化状态、形式和成因, 在此基础上, 采用差异化的恢复方式, 提升草地恢复效率, 达到健康状态。

(2) 长远目标和阶段性目标的有机结合。高寒草地适应性管理的目标包含了长远目标和阶段性目标。长远目标是维持高寒草地生态系统结构和功能的可持续发展, 最终实现青藏高原生态保护和高质量发展; 阶段性目标是依据高寒草地类型和当前状态确定的, 以解决一个阶段内的关键性问题为导向的短期目标。可持续发展的长远目标是一个长期、复杂、动态的过程, 由各个阶段性管理目标组成; 阶段性管理目标则以长远目标为导向, 聚焦当前阶段内关键性问题的解决。

(3) 持续监测。对高寒草地生态系统“水体-土壤-气象-生物”各要素进行定点持续监测对于适应性管理具有极为重要的意义, 它既是认识管理对象和确定管理目标的坚实基础, 也是评估管理措施是否有效的关键依据。在制定管理方案的同时, 确定用于评估管理目标的关键指标, 在实施管理措施的过程中, 持续监测既定指标, 在一个阶段的管理过程结束后, 对管理前后的结果进行评估。

(4) 动态管理过程。高寒草地生态系统是开放、动态、充满不确定性的, 与外界各环境要素之间时刻发生着物质、能量和信息的交换, 因此系统的各个过程会受到外部环境要素变化的影响。由于草地生态系统本身具有对环境干扰的自适性(self-adaption)或抵抗性(resistance), 在一定的范围之内, 系统可自我调整保持相对稳定性, 表现为生态系统特征的状态变量是动态的, 是随着时间发生变化的, 以及生态系统内部存在多种机制的反馈回路。因此适应性管理必须是根据草地生态系统的状态和管理目标不断积累经验和反馈知识、不断优化调整的动态管理过程。

## 3 适应性管理是青藏高原高寒草地管理的必然途径

### 3.1 高寒草地生态系统的固有属性: 脆弱性和敏感性

青藏高原的地质历史发育极其年轻, 受多种因素共同影响, 形成了地球上最高、最年轻、水平地带性和垂直地带性

图 1 (网络版彩色)高寒草地适应性管理概念图

Figure 1 (Color online) The conceptual graph of the alpine grassland adaptive management

紧密结合的自然地理单元。青藏高原的形成过程很复杂，数次的地质构造运动使得青藏高原不断抬升，海拔升高的同时，也形成了高山大川密布、地势险峻多变的复杂地貌，平均海拔超过4000 m。同时，海拔落差大(海拔为8848.86 m的珠穆朗玛峰与海拔为1503 m的金沙江)，水分热量差异明显，加之复杂地貌地表形态的共同作用，形成了一个水平地带性和垂直地带性紧密结合、特殊的广袤区域，造就了青藏高原丰富的地貌多样性、气候多样性、生物多样、生态系统多样性和景观多样性<sup>[13]</sup>。

脆弱是高寒草地生态系统的本质特征之一<sup>[14]</sup>，组成该生态系统的物质和能量具有动态不稳定性质，对外力作用的响应具有快速易变的特点。高寒草地的脆弱性还体现在对全球变化和人类活动响应的高度敏感上。脆弱的生态系统、成土时间短、土壤层薄、严酷的自然条件，使得高寒草地植被对外界干扰十分敏感，一旦被破坏，难以恢复。黑土滩正是高寒草甸(高寒草地的重要类型)的植被遭到外界干扰破坏后，呈现出的极度退化状态，是困扰当地政府和牧民的痼疾。自20世纪90年代以来，高原科研工作者为破解黑土滩的形成机理、研发有效的恢复措施付出了巨大的努力，国家和地方政府为治理黑土滩投入了巨额的资金，历经30余年，黑土滩的恢复治理依然是高寒草地生态保护和利用中的重点和难点。

### 3.2 全球变化的敏感区和中国气候变化的启动区

由于独特的自然地理环境，青藏高原是全球变化的敏感区和预警区，也是中国气候变化的启动区。作为世界第三极，青藏高原边界的动力和热力强迫作用改变了周围的大气环流，形成了高原季风，对我国乃至欧亚大陆的气候产生着深刻影响。因此，青藏高原生态系统的变迁深刻影响着区域、甚至全球的气候。同时青藏高原生态系统也被认为对全球气候变化更敏感，系统的行为往往比周围地区更早、更明显地预兆全球变化，是全球变化信号的放大器。

青藏高原在全球气候变化和社会经济剧变的双重作用下，已发生并且持续发生着显著的改变<sup>[15]</sup>。随着青藏高原与外界之间交通体系的建立和发展，大量外来人员涌入，给当地原本就有限的环境承载带来了更大的压力，区域内的生态系统和野生生物受人类经济活动的威胁，生物多样性遭到破坏，生态系统稳定性降低、结构失调、功能减弱，为区域社会经济发展、牧民生产和生活、生态安全等造成了负面影响。根据已发布的第二次青藏高原综合科学考察研究的首期成果显示(2018年9月5日第二次青藏高原科学考察首期成果于拉萨市发布，<https://news.scichina.com/htmlnews/2018/9/417291.shtml>)：青藏高原和毗邻地区的冰川退缩与冻土融化明显，湖泊面积和河流径流量增加，亚洲水塔失衡，灾害频发；气候暖湿化下，植被盖度提高，林线上升，森林生物量增加。然而与此同时，高寒灌丛、草甸面积缩减，这可能使得青藏高原特有物种面临消失的风险。

### 3.3 高质量发展和高品质生活的需求

根据考古及文献资料，畜牧业一直是生活在高寒牧区人民的支柱产业。过去，90%以上的牧民生活资料依赖于畜牧业，包括衣、食、住、行等方面；当今，畜牧业依然是青藏高原地区的支柱产业和特色产业，是当地牧民的重要生计来源，牦牛和藏羊养殖是社会经济发展不可或缺、不可割舍的部分。

然而由于缺乏现代化技术手段，在传统畜牧业管理方式下，牧民对草场的利用率非常低，很难全面、便捷地掌握牧草生长、气象灾害和动物疫情等信息，只能被动地适应环境、接受灾情，通过放牧获得经济收益充满了不确定性。正是由于这种不确定性，草原牧区通常是贫困人口的集中分布区，而且深度贫困人口的比重较大。因此，在传统的放牧方式下，牧民维持生计困难，草原生态形势严峻，畜牧业的发展效率低、消耗大、效益低，形成了恶性循环<sup>[16]</sup>。这与新时代下人民追求美好生活的愿望是不符合的，与青藏高原重要生态屏障功能的发挥是不符合的，与青藏高原国际生态文明高地的建设要求是不符合的。

综上所述，青藏高原高寒草地所固有的脆弱和敏感属性决定了在全球变化和人类活动影响下，生态系统愈加复杂，不确定性增加，这使草地生态系统可持续发展的难度增加。同时，人类对草地的需求已经从单一、产出畜产品的“生产资料”，上升到对草地的生态、生产、生活功能全方位的需求，包括可以直接使用的“生活资料”、可以直接消费的“生态服务功能”(生物多样性维持、水源涵养等)和“生态产品”(旅游、文化传承等)。因此，要充分发挥高寒草地作为我国乃至东亚地区的重要生态屏障、现代畜牧业发展基地和民族团结社会稳定基石的作用，实现高寒牧区社会经济的高质量发展，保障牧民过上高品质生活，转变草地管理理念和方式，进行适应性管理势在必行。

## 4 高寒草地适应性管理的理论基础

### 4.1 基础理论

#### 4.1.1 恢复力理论

Resilience(恢复力)源自拉丁语动词resilio，其中re意为回去，silio意为跳跃，在物理学中表示弹性材料在不超过其弹性极限的变形后可以恢复到原始形状或者位置的能力。恢复力理论(resilience theory)，也被译为弹性理论，是生态学家Holling<sup>[17]</sup>在1973年由物理学领域引入到生态学领域，随后又延伸到社会-生态领域。2002年，Holling团队<sup>[18]</sup>将恢复力定义为“一种能缓冲变化所带来的影响、学习知识和求得发展的能力”。恢复力理论认为，生态系统具有复杂性和不确定性，在一定程度上表现出动态特征，但仍能保持正常的结构和功能，而当变化超过了原生态系统的恢复力时，会形成新的稳定状态，即生态系统存在多个稳态。这意味着生态系统(包括高寒草地生态系统)的时空异质性和动态变化是必然的，传统的静

态管理方式在面对生态系统的复杂性和不确定性时必然会陷入困境。适应性管理正是基于生态系统的恢复力，正视或者接纳生态系统的可变性，通过决策过程中的系统化学习应对不确定性。

#### 4.1.2 权变理论和三因制宜

权变理论(contingency theory)是20世纪60年代以来发展起来的管理学理论，该理论认为，在管理中没有一成不变、普遍适用的“最好的”管理方法，权变管理是根据环境因素、管理思想和管理技术之间的相互关系确定的一种最有效的管理方式，强调在管理中要根据组织所处的内外部条件随机应变，针对具体条件寻求最合适的管理方法。权变的英文表达contingency的基本含义是随机制宜或随机因变，可对应于中国传统哲学体系中的三因制宜，即因地制宜、因时制宜和因情制宜。因地制宜，强调要根据事物所处的不同环境制定适宜的策略；因时制宜，强调根据事物发展的不同阶段制定适宜的策略；因情制宜，则强调根据事物的不同特征和发展趋势制定适宜的策略。三因制宜在高寒草地生态系统的适应性管理中表现为(图2)依据高寒草地的自然地理属性(因地制宜)和动态特征(因时制宜)，以及草地的当前状态和阶段性的管理目标(因情制宜)制定管理措施或者方案。

生态系统的复杂性和不确定性决定了人类对生态系统内在规律的认识始终具有局限性，但人类不可能在对生态系统完全认识之后再进行管理。我们对生态系统的信息了解不全面，管理措施的效果存在一定的不确定性，然而管理又势在必行时，适应性管理不失为一种有效的管理方式。作为动态的管理方法，适应性管理是一个不断完善的过程，是面对生态系统的复杂性和不确定性，以及在人类对生态系统的认识不断积累的条件下，实现生态系统可持续发展的可行方法。

### 4.2 理论研究和应用实践基础

由于海拔高、气候恶劣、自然条件严酷，相对于世界上其他地方的草地，人类对青藏高原高寒草地的研究起步较晚，

新中国成立后，青藏高原研究被纳入国家战略科技任务，是《1956~1967年科学技术发展远景规划纲要》的重要内容。1973~1976年，我国开展了首次大规模的青藏高原综合科学考察研究，这一次考察获得了大量的第一手资料，填补了青藏高原部分地区和学科研究的空白，也拉开了我国对青藏高原研究的序幕。在随后的40余年，我国科学家对青藏高原高寒草地生态系统展开了大量的基础研究：高寒草地结构和功能及其系统内的物质交换和能量流动、草地生产力的维持和提升、高寒草地对气候变化和放牧的响应与适应、高寒草地演变的环境-生物-土壤-功能联动机制、基于生态过程的高寒草地分类管理技术和典型受损生态系统功能提升关键技术的研发与示范等<sup>[8]</sup>。这些研究工作为高寒草地适应性管理奠定了理论和实践基础。

#### 4.2.1 高寒草地生态系统的基本特征

高寒草地植物群落结构通常比较简单，分层不明显。一般而言，高寒草甸物种数可达30种及以上，盖度可达70%~95%，高寒草原物种数则较少，一般为20种左右，盖度也比高寒草甸低。不同草地类型之间，生产力差异较大，高寒草甸地上生产力可达300~400 g m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>，高寒草原则较低，约为200 g m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>，总体上呈现东南高、西北低的空间分布格局<sup>[8]</sup>。

青藏高原高寒草地生态系统碳循环过程呈现碳储量大、净初级生产力较高、土壤有机质分解慢、较高强度(生长季内)和低循环的特点(与国内其他草地类型相比)。青藏高原生态系统碳储量大，主要储存在植物和土壤中，以植物生物量和土壤有机碳及无机碳的形式存在。由于温度低、分解慢，因此土壤碳储量较大，据估算，青藏高原土壤和植被碳库分别为35.2和4.3 Pg C<sup>[19,20]</sup>。总体上，青藏高原表现为碳汇，通过不同方法的研究，当前碳汇为26.5~33.7 Tg C/a<sup>[20]</sup>，而且固碳增汇潜力大，合理放牧等可持续管理方式将有助于进一步维持青藏高原碳汇功能<sup>[21]</sup>。

#### 4.2.2 高寒草地生态系统对气候变化的响应

气候变化(升温、气候异常事件、降水格局改变等)已经并持续影响着高寒草地生态系统的结构、格局和功能，而且对不同类型高寒草地产生的影响不尽一致<sup>[11,21~23]</sup>。总体上，自20世纪80年代至今，地面观测数据表明，青藏高原的物候呈现返青期提前、枯黄期延长、整个生长期延长的趋势。而遥感数据则发现，自20世纪90年代中后期到21世纪初，物候变化呈现相反的趋势，但在2005年以后，返青期又较以前提前了。升温使不同开花期物种的花期提前，而且早开花物种比中、晚期开花物种对升温更敏感，从而降低了物种间的开花同步性，延长了群落水平的开花期，同时降水及其与增温的相互作用对开花物候没有显著的影响<sup>[24]</sup>。早期的开顶式生长室(open top chamber, OTC)增温试验发现，增温会导致高寒草地物种数减少，多样性降低<sup>[25]</sup>。随后在同一研究地点，Wang等人<sup>[26]</sup>以红外模拟增温试验发现，增温对物种丰富度影响较小，

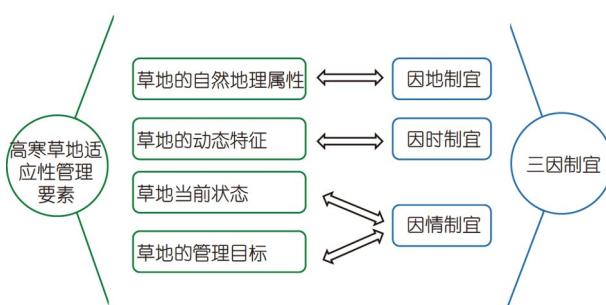


图2 (网络版彩色)高寒草地适应性管理要素和三因制宜的对应关系

**Figure 2** (Color online) Corresponding relationship between elements of the alpine grassland adaptive management and measures-adjusted-to-location-time-situation

但显著改变了群落中功能群的比例。增温年限对物种丰富度的变化有显著的影响，在增温的前4年，高寒草甸群落物种明显减少(11~19种)，但在长达18年的持续增温后，群落的物种丰富度恢复到了最初的状态<sup>[27]</sup>。

在青藏高原，低温是限制高寒草地植物生长和微生物活动最主要的因素，因此温度升高和生长季延长通常有利于植物生长和微生物活性的增加，但是其效应受到草地类型、季节、降水量和增温幅度等的影响<sup>[21]</sup>。研究发现，春秋两季增温对生产力的促进作用高于夏季增温，因而生长季开始前后的气候条件对草地生产力有关键性的影响<sup>[28]</sup>；非生长季增温幅度较大时，植物地上生物量高于生长季增温幅度较大时，主要是由于冬季增温有利于微生物活动和可利用氮含量的增加<sup>[29]</sup>；在湿润区，温度是生产力的限制因子，增温通常会增加生产力，但在干旱区降水量是限制因子，增温对生产力没有影响或者有抑制作用<sup>[21]</sup>。Liu等人<sup>[30]</sup>结合增温降水模拟试验和青藏高原9地的长期监测数据认为，增温和降水改变会影响群落结构以及生产力在地上地下的分配模式，而群落结构的改变有利于草地生产力的稳定。

高寒草地土壤中蕴含着大量的有机碳，碳储量超过了占全青藏高原土壤碳储量的50%<sup>[21]</sup>，气候变化(增温和降水格局改变)下，作为净碳输入过程的净初级生产力与净碳输出过程的土壤呼吸异养组分之间的平衡是决定生态系统碳源、汇功能的关键过程<sup>[22]</sup>。研究表明，增温会增加高寒草地生产力，但同时也会加快枯落物和家畜粪便的分解，从而促进土壤呼吸，而且土壤微生物活动存在对增温的驯化，因而对于限制因子不同的生态系统，其碳循环过程对增温和降水的响应不一，受温度限制的高寒草甸碳循环过程对温度变化的响应比较敏感，而受水分限制的高寒草原碳循环过程对降水变化的响应更为敏感<sup>[21]</sup>。此外，不同深度土壤碳含量对增温的响应也存在差异，由于增温促使高寒草甸植物根系向下延伸到更深的土层，深层土壤中新合成有机碳的输入增加，从而使得深层土壤有机碳含量增加<sup>[31]</sup>。

#### 4.2.3 高寒草地生态系统对放牧响应的研究

青藏高原放牧生态学的研究方兴未艾，放牧强度、放牧制度和放牧方式(家畜类型及其比例)等对草地生态系统的影响，均是高寒草地放牧生态系统研究的关键问题。过度放牧被认为是引发草地退化的主要人为因素，很多研究都探讨了放牧强度对草地生物量和群落结构的影响。研究表明，放牧通常会减少植物地上现存量和地下生物量。也有研究发现，重度放牧下群落生物量会增加，这主要是由于重度放牧下杂类草大量入侵的结果。对群落结构影响的研究表明，莎草和禾草等优良牧草在高强度放牧压力下通常会发生个体矮小化、生物量降低，因此，群落中优质牧草减少，草地开始退化。然而，放牧对群落净生产力影响的研究表明，“中度干扰”现象在青藏高原普遍存在，适度放牧会促进植物补偿性生长，对青海省果洛州高寒草甸和海北州高寒草原化草甸的研究均

发现，在中等放牧强度下，放牧可促进植物生长，草地净生产力增加<sup>[32,33]</sup>。

高寒草地物种多样性对放牧的响应随研究地点、群落类型、放牧管理方式等而不同。如Li等人<sup>[34]</sup>发现，不放牧条件下，草地群落多样性指数和均匀度指数高于连续放牧，但是低于返青期休牧下的各项指标。而Ganjurjav等人<sup>[35]</sup>的试验发现，轻度放牧和中度放牧增加了群落的物种多样性。Zhang<sup>[36]</sup>在青海湖流域高寒草原的研究发现，连续放牧和季节性放牧下，随着放牧强度的增加，物种丰富度和多样性均降低，相较于连续放牧，季节性放牧对群落结构的影响较小。

#### 4.2.4 高寒退化草地退化机理和修复技术研究

高寒草地退化是制约青藏高原生态保护和畜牧业发展的痼疾，自20世纪70年代以来，高寒草地开始发生退化，到20世纪90年代，约有50%的草地处于不同程度的退化状态。关于高寒草地退化的研究主要集中在退化面积以及退化程度的确定、草地退化成因机理和退化草地修复治理技术等方面<sup>[37]</sup>。

高寒草地退化是受人类活动和气候变化双重压力影响、由内因和外因共同作用而导致，已被大多数学者认可。高寒草地退化的内因在于高寒草地生态系统的“惰性”——受到低温影响，高寒草地土壤中有机质分解速率低，生态系统物质循环和能量流动低，造成了植物和土壤间营养需求和供给的不平衡，系统的自我更新速度缓慢、自我恢复能力弱，一旦外界环境因素变化、系统平衡被打破，难以自我恢复。“气候变化”“超载过牧”“鼠害”则是高寒草地退化的主要外因。董全民等人<sup>[38]</sup>定量分析了人为和自然因素对高寒草地退化的驱动贡献率，提出了退化因素多因子假说。研究显示：气候变化和人类活动是导致高寒草地退化的两大因素，其中气候变化的影响占32%，人类活动的影响达到了68%，而鼠虫害是草地超载过牧后的副产物，对这两种因素所产生的作用推波助澜，进一步加深了草地的退化程度。

当前高寒退化草地的恢复技术主要有：围栏封育、天然草地补播和人工草地建植等<sup>[37,38]</sup>。其中围栏封育和天然草地补播主要用于轻度和中度退化草地，而重度和极度退化草地则多用人工草地建植的方式进行修复治理。人工草地建植时主要以禾本科植物为主，如垂穗披碱草、青海草地早熟禾、中华羊茅等乡土物种，种植方式有单播和混播，并辅以灭杂草、灭鼠害和施肥等管理措施。人工草地建植4~5年后极易发生退化，群落中杂类草增加、优良牧草比例降低、群落生物量大幅度降低，土壤养分含量减少，引发黑土滩的二次发生。黑土滩的二次发生使人工草地的生态效应和经济效益迅速降低，这也使人们意识到退化草地的形成机理和恢复技术依然有诸多机理问题和技术难题需要攻克。随着对退化高寒草地生态系统恢复过程和机制研究的不断深入，以及对高寒草地多功能性和多服务性的认识和需求不断提高，近自然修复理念被应用到退化草地修复研究中，以“优良乡土草种筛选、扩繁及组配”“土壤养分及微生物调控”为关键技术的研

究, 可期为退化高寒草地生态系统恢复提供一个基于自然的解决方案<sup>[39]</sup>.

#### 4.2.5 现代生态畜牧业转型升级研究

青藏高原畜牧业生产历史悠久, 一直是当地的支柱产业和特色产业, 近万年来, 高原牧民在草地上放牧, 获取生活资料和生产资料, 延续至今。在早期人口和牲畜比较少的情况下, 游牧民族逐水草而居, 人类、家畜和草地之间可以达到平衡, 但是随着人口和牲畜数量增多, 天然草原放牧成为一种生产力很低的生产方式, 而且由于放牧强度增加, 同时叠加气候变化的影响, 高寒草地大面积退化, 生态系统结构紊乱、功能下降、稳定性降低, 即天然草地生态功能和生产功能配置失衡, 高寒牧区陷入了“贫穷-生态环境破坏-更加贫穷”的恶性循环, 青藏高原畜牧业发展面临着生产效率低、市场不成熟不完善、发展不均衡等诸多困境<sup>[16]</sup>, 探索集“生态保护-民生改善-经济发展-社会进步”协调发展的现代生态畜牧业发展模式和途径, 促进并实现青藏高原畜牧业转型升级, 仍然任重道远。

自“十三五”以来, 多项以“智慧畜牧业”“现代牧场”“智能管理”为理念的国家和省级重大项目落地青藏高原<sup>[40]</sup>。突出“自动采集”“智能化”“大区域”“全景式”等特点的草地管理技术研究不断突破瓶颈: 如利用“3S”技术进行草地群落特征、生产力和营养成分的反演估测<sup>[41,42]</sup>; 利用普通数码相机结合图像处理技术, 可实现对不同季节放牧牦牛的体重估测(精度为86%~97%)<sup>[43]</sup>; 电子围栏和电子耳标等技术日臻完善, 覆盖草地、家畜、气象的数据采集系统正在青藏高原高寒草地上不断建成。随着这些单项和集成技术的不断优化完善, 必将汇聚形成强大的科技合力, 推动青藏高原高寒草地畜牧业转型升级。

## 5 高寒草地适应性管理的实现途径

### 5.1 高寒草地适应性管理实现的一般过程

根据高寒草地适应性管理的概念和内涵, 其一般过程包含如下5个步骤(图3): (1) 认识管理对象。适应性管理的对象是高寒草地, 由于受地质、地貌和气候的影响, 高寒草地类型丰富, 加之人类活动和气候变化的影响, 部分草地正处于退化阶段, 因此适应性管理的第一步是界定草地类型, 明确草地健康属性, 尽可能多地收集草地结构和格局的信息。(2) 确定管理目标。草地适应性管理的长远目标或者最终目标是维持和提升高寒草地生物多样性和生态系统多功能, 实现草地的可持续发展, 但是长远目标不可能一蹴而就, 需要以可持续发展为导向, 聚焦每个阶段的关键问题, 针对性地制定阶段性管理目标。(3) 制定管理方案。高寒草地适应性管理措施的制定需要符合三因制宜原则, 需审慎考虑气候变化和人类活动的影响, 界定管理的时空尺度, 选择管理过程中可反映生态系统变化的关键指标, 同时必须将管理策略的执行者纳入到管理体系中, 这关系到管理方案的可操作性和可执行性。(4) 实施管理方案。通过制度建立和监督等措施, 确保管理措施的完整实施, 同时严格按照既定方案, 持续监测生态系统、收集数据, 为评估管理成效和调整管理方案提供科学依据。(5) 评估管理成效。选择适宜的评价方法或者评价体系评估管理措施的效果是否达到了预期目标, 根据评估结果, 或者调整管理方案, 或者调整管理对象的边界和尺度, 直至调整或者修改管理的目标, 进入高寒草地适应性管理的下一个循环过程。

高寒草地生态系统是复杂的, 而人类对其的认知始终存在局限性, 但是管理的过程, 也是人类对高寒草地再认识的过程, 这些知识和经验可以应用到下一个阶段的管理中, 通过这样的实践、学习、调整、再实践、再学习、再调整的循环往

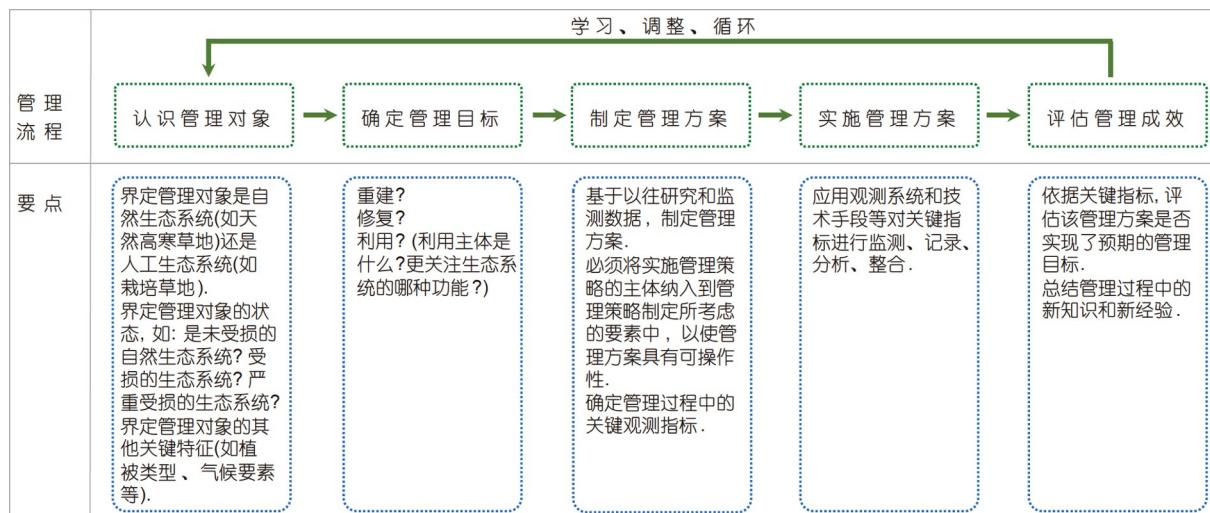


图 3 (网络版彩色)高寒草地适应性管理一般过程框架图

Figure 3 (Color online) The framework of general process of the alpine grassland adaptive management

复过程,适应管理对象状态的变化、影响因素(气候变化和人类活动等)的变化、生态系统和生态系统外部环境以及人类需求的变化,实现高寒草地生态系统的可持续管理目标。

退化高寒草地分类分级恢复技术是在高寒草地进行适应性管理尝试的成功案例。依其类型,退化草地分为退化高寒草原和退化高寒草甸,进一步依据相应指标体系和退化等级分类标准,划分为轻度退化、中度退化、重度退化和极度退化,根据其类型和退化等级,选择适宜的管理措施<sup>[38]</sup>(表1)。实施管理措施的同时,对关键指标,如群落盖度、生物量、土壤有机质等指标持续监测,在恢复措施实施一定年限后,评估恢复效果。经评估,对已恢复到健康状态的草地,调整管理目标,进行适度放牧,实现高寒草地生态-生产功能的协调发展;对仍然处在退化阶段的草地,重新界定退化等级,调整恢复管理措施,坚持生态恢复和保护优先的适应性管理措施。

## 5.2 加强高寒草地生态系统的长期监测,夯实理论基础和大数据基础

如前文所述,认识管理对象是进行适应性管理的第一步。在过去的40多年间,我国科研工作者克服青藏高原恶劣的自然条件,在高寒草地群落结构和功能及其系统内的物质交换和能量流动、草地生产力的维持和提升、高寒草地对气候变化和放牧的响应与适应、退化草地等级划分和恢复措施等方面,已取得了丰富的研究成果,这为当前进行高寒草地适应性管理的理论发展和实践应用提供了宝贵的数据和重要的理论支撑。然而青藏高原幅员辽阔,草地面积大、类型丰富,气候复杂多变,又是全球变化的敏感区,我们对高寒草地的认识仍然不足。要加强高寒草地适应性管理,需依托长期定位观测站和控制实验对高寒草地生态系统基础理论等

进行深入研究,包括草地退化机理和过程、草地系统“土-草-畜-人”关系、草地系统发展的定性趋势辨别与定量阈值判断依据和方法等。

当前青藏高原高寒草地长期定位观测站数量较少,难以覆盖不同生态系统类型,因此亟须加强长期定位观测站的建立和建设。通过在不同生态功能区建立观测站,对高寒草地生态系统从“水体-土壤-气象-生物”进行全面监测(表2),获得基础样品和有效数据,揭示高寒草地生态系统过程及其在气候变化和人类活动影响下的演变机制,建立精确的动态预测模型,为高寒草地适应性管理奠定理论基础。与此同时,不同长期定位观测站间应加强沟通协调,统一监测指标和方法等,规范数据存储形式,避免形成“数据孤岛”,提高数据共享和整合,为在不同时空尺度上的适应性管理夯实理论基础。

尽管长期定位观测和野外控制试验在积累长时间尺度数据和机制研究方面具有十分重要且不可替代的作用,但对于提供大空间尺度上的基础数据存在较大的局限性,因此要结合多途径多手段监测和数据融合的技术,对高寒草地进行大空间尺度和长时间尺度的监测,构建数字高寒草地信息网络,通过数据挖掘与开发,量化辨识气候变化和人类活动干扰下高寒草地生态系统的进程及其应对机制,甄别高寒草地管理的问题和需求,监测和评估草地管理的解决方案,不断修正优化,实现对草地的适应性管理,充分发挥高寒草地的资源效力。

## 5.3 融合多学科、多维度的理论、知识和技术,建立系统思维

高寒草地适应性管理是一个复杂工程,它是基于对高寒草地生态系统不同层次、不同时空尺度规律准确把握的基

**表1** 退化高寒草地分类分级恢复措施<sup>a)</sup>

**Table 1** The restoration measures of degraded alpine grassland based on classification and gradation

草地类型	退化程度	恢复措施
退化高寒草原	轻度退化	采用鼠害防治+生长季禁牧、鼠害防治+轮牧、封育禁牧、施肥+封育禁牧、毒杂草防除+施肥+禁牧等措施治理
	中度退化	采用封育禁牧、鼠害防治+封育、鼠害防治+施肥+封育禁牧、毒杂草防除+施肥+封育禁牧、鼠害防治+免耕补播+施肥+禁牧、鼠害防治+补播+毒杂草防除+施肥+禁牧等措施治理
	重度退化	封育禁牧+鼠害防治,降低人类和动物干扰,进行长期自然恢复
退化高寒草甸	轻度退化	根据草地退化的主要限制因子,进行以生物防控为主的鼠害防治、鼠害防治+封育和毒杂草防除+生长季禁牧模式,以降低草地干扰为主的生长季禁牧+轮牧、施肥+封育禁牧、毒杂草防除+施肥+生长季禁牧模式
	中度退化	以提高草地恢复力为目标的鼠害防治+封育、施肥+封育禁牧、毒杂草防除+施肥+禁牧模式,鼠害防治+补播+施肥+禁牧、鼠害防治+补播+毒杂草防除+施肥+禁牧的改良模式
	重度退化	依据地形条件分级治理,坡度小于7°且土壤条件较好的重度退化高寒草甸,采用免耕补播或机械翻耕,种植适宜草种,将其改建为半人工草地或人工草地;坡度在7°~25°之间且土壤条件较好的,依据退化程度,采用免耕补播改建为半人工草地,除以上之外的重度退化高寒草甸,采用封育禁牧和鼠害防治的措施,逐步恢复植被及其生态功能

a) 所列恢复措施为本团队的研究成果,见参考文献[38]

**表 2** 高寒草地生态系统长期监测指标**Table 2** Monitoring indicators of alpine grassland ecosystem

监测对象	推荐监测指标
水体	水体的溶氧量、碳氮含量等理化性质; 藻类生长情况等
土壤	土壤含水量、容重、碳氮磷钾含量等理化性质; 土壤微生物多样性、土壤动物多样性等
气象	气温、降水、日照时数、光合有效辐射、大气干湿沉降等
生物	植物: 群落结构、指示种群、物候、生物量/生产力动态、营养成分等; 动物: 牲畜种类、数量和结构, 动物物候等
其他	草地灾害: 雪灾、旱情、火灾、鼠害、虫灾等

础上, 综合生态、经济、社会、文化等诸多方面的影响和需求、以实现系统利益最大化且可持续为目标的管理, 无疑需要系统、全面、深刻的理论和技术作为支撑, 这就要求实现多学科、多维度理论知识的深度有机融合, 需要整合各个单项技术, 建立技术体系, 推进基础研究走向应用。

在突出“生产性”目标的传统草地管理过程中, 支撑草地管理的基础理论主要是产生于草学与畜牧学的理论, 如牧草的再生生长机理、家畜的营养平衡理论、单位面积最适载

畜量/最大载畜量理论等<sup>[7]</sup>。然而与其他生态系统一样, 草地生态系统充满不确定性, 对环境变化的响应极其复杂, 而我们对草地生态系统在气候变化和人类活动影响下的关键过程及其内在作用机制等的认识十分有限, 同时人类社会对草地多样化“功能与服务”的需求日益增长, 要进行草地的适应性管理必须是基于对生态系统发生、发展、运行、维持与演变机理的正确认识和准确把握的基础之上。因此, 面对复杂的草地适应性管理, 必须做好多学科理论、多维度知识与方法的融合, 认识和了解草地生态系统及其对环境变化响应的过程和机理, 建立系统思维, 并将其应用到草地管理之中, 应对结构复杂、过程复杂和功能复杂的草地生态系统。

## 6 结语

高海拔赋予了高寒草地独特的属性: 生态脆弱、生产力低、稳定性差、抗干扰能力弱, 在气候变化和人类活动的强烈影响下, 草地大面积退化, 生态系统结构紊乱, 生产功能和生态服务功能急剧下降, 这一切使得高寒草地的管理面对着前所未有的挑战。明确高寒草地适应性管理的概念和内涵, 是我们厘清高寒草地管理目标的基础, 明确草地管理目标是我们开展有效科学的基础, 进而才能推动高寒草地管理理论和实践的深入发展, 为青藏高原生态保护和高质量发展提供理论和技术支撑。

**致谢** 感谢青海省科技厅创新团队项目(2021-ZJ-901)、2021年度中国科学院“西部之光”人才培养计划和国家自然科学基金(32160343)资助。

## 推荐阅读文献

- Holling C S. Adaptive Environmental Assessment and Management. London: John Wiley, 1978
- Feng Y, Cao Y G, Geng B J, et al. Ecosystem adaptive management: Theoretical connotations and management applications (in Chinese). *J Agric Resour Environ*, 2021, 38: 545–557 [冯漪, 曹银贵, 耿冰瑾, 等. 生态系统适应性管理: 理论内涵与管理应用. *农业资源与环境学报*, 2021, 38: 545–557]
- Chaddan A, Dowksza E, Turner L. Adaptive Management for Southern California Grasslands. Technical Report. Donald Bren School of Environmental Science and Management, University of California, Santa Barbara. 2004
- Wong N, Morgan J. Review of grassland management in southeastern Australia. Melbourne: Parks Victoria, 2007
- Hou X Y, Yin Y T, Ding Y. An overview and prospects for grassland adaptive management in China (in Chinese). *Acta Pratac Sin*, 2011, 20: 262–269 [侯向阳, 尹燕亭, 丁勇. 中国草原适应性管理研究现状与展望. *草业学报*, 2011, 20: 262–269]
- Yang L, Yang C. Grassland degradation and ecosystem management in western area of China (in Chinese). *Acta Sci Nat Univ Neimongol*, 2004, 35: 205–208 [杨理, 杨持. 草地资源退化与生态系统管理. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 2004, 35: 205–208]
- Wang D L, Wang L. A new perspective on the concept of grassland management (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2019, 64: 1106–1113 [王德利, 王岭. 草地管理概念的新释义. *科学通报*, 2019, 64: 1106–1113]
- Cao G M, Lin L, Zhang F W, et al. Long-term ecological research and experimental demonstration provide theoretical and technical support for adaptive management of alpine grassland (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2018, 33: 1115–1126 [曹广民, 林丽, 张法伟, 等. 长期生态学研究和试验示范为高寒草地的适应性管理提供理论与技术支持. *中国科学院院刊*, 2018, 33: 1115–1126]
- Sun J, Zhang Z C, Dong S K. Adaptive management of alpine grassland ecosystems over Tibetan Plateau (in Chinese). *Pratac Sci*, 2019, 36: 933–938 [孙建, 张振超, 董世魁. 青藏高原高寒草地生态系统的适应性管理. *草业科学*, 2019, 36: 933–938]
- Zhao L, Li Q, Zhao X Q. Multi-functionality and management of grassland in the Sanjiangyuan region (in Chinese). *Resour Sci*, 2020, 42: 78–86

- [赵亮, 李奇, 赵新全. 三江源草地多功能性及其调控途径. 资源科学, 2020, 42: 78–86]
- 11 Sun J, Zhou T C, Zhang J T. Climate change adaptive management of alpine grassland on the Tibetan Plateau (in Chinese). Environ Sustain Dev, 2021, 46: 55–60 [孙建, 周天财, 张锦涛. 青藏高原高寒草地的气候变化适应性管理探讨. 环境与可持续发展, 2021, 46: 55–60]
  - 12 Ma Y S, Lang B N, Wang Q J. Review and prospect of the study on ‘black soil type’ deteriorated grassland (in Chinese). Pratac Sci, 1999, 16: 5–9 [马玉寿, 郎百宁, 王启基. “黑土型”退化草地研究工作的回顾与展望. 草业科学, 1999, 16: 5–9]
  - 13 Spicer R A, Su T, Valdes P J, et al. Why ‘the uplift of the Tibetan Plateau’ is a myth. Natl Sci Rev, 2021, 8: nwwaa091
  - 14 Yu B H, Lü C H. Assessment of ecological vulnerability on the Tibetan Plateau (in Chinese). Geogr Res, 2011, 30: 2289–2295 [于伯华, 吕昌河. 青藏高原高寒区生态脆弱性评价. 地理研究, 2011, 30: 2289–2295]
  - 15 Piao S L, Zhang X Z, Wang T, et al. Responses and feedback of the Tibetan Plateau’s alpine ecosystem to climate change (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 2842–2855 [朴世龙, 张宪洲, 汪涛, 等. 青藏高原生态系统对气候变化的响应及其反馈. 科学通报, 2019, 64: 2842–2855]
  - 16 Dong Q M, Mao X R, Tao P, et al. Construction of Intelligent Ecological Animal Husbandry Platform in Three-River-Source Area—A Case Study of Zeku County and Henan County (in Chinese). Xining: Qinghai People’s Publishing House, 2021 [董全民, 毛学荣, 陶品, 等. 三江源智慧生态畜牧业平台建设——以河南泽库典型区为例. 西宁: 青海人民出版社, 2021]
  - 17 Holling C S. Resilience and stability of ecological systems. Annu Rev Ecol Syst, 1973, 4: 1–3]
  - 18 Folke C, Carpenter S, Elmqvist T, et al. Resilience and sustainable development: Building adaptive capacity in a world of transformations. AMBIO-J Hum Environ, 2002, 31: 437–440
  - 19 Ding J, Wang T, Piao S L, et al. The paleoclimatic footprint in the soil carbon stock of the Tibetan permafrost region. Nat Commun, 2019, 10: 4195
  - 20 Wang T, Piao S L. Estimate of terrestrial carbon balance over the Tibetan Plateau: Progresses, challenges and perspectives (in Chinese). Quat Sci, 2023, 43: 313–323 [汪涛, 朴世龙. 青藏高原陆地生态系统碳汇估算: 进展、挑战与展望. 第四纪研究, 2023, 43: 313–323]
  - 21 Chen H, Ju P, Zhu Q, et al. Carbon and nitrogen cycling on the Qinghai-Tibetan Plateau. Nat Rev Earth Environ, 2022, 3: 701–716
  - 22 Wang C S, Meng F D, Li X E, et al. Responses of alpine grassland ecosystem on Tibetan Plateau to climate change: A mini review (in Chinese). Chin J Ecol, 2013, 32: 1587–1595 [王常顺, 孟凡栋, 李新娥, 等. 青藏高原草地生态系统对气候变化的响应. 生态学杂志, 2013, 32: 1587–1595]
  - 23 Wang Y, Lü W, Xue K, et al. Grassland changes and adaptive management on the Qinghai-Tibetan Plateau. Nat Rev Earth Environ, 2022, 3: 668–683
  - 24 Chen Y Y, Collins S L, Zhao Y P, et al. Warming reduced flowering synchrony and extended community flowering season in an alpine meadow on the Tibetan Plateau. Ecology, 2023, 104: e3862
  - 25 Klein J A, Harte J, Zhao X Q. Experimental warming causes large and rapid species loss, damped by simulated grazing, on the Tibetan Plateau. Ecol Lett, 2004, 7: 1170–1179
  - 26 Wang S, Duan J, Xu G, et al. Effects of warming and grazing on soil N availability, species composition, and ANPP in an alpine meadow. Ecology, 2012, 93: 2365–2376
  - 27 Zhang C, Willis C G, Klein J A, et al. Recovery of plant species diversity during long-term experimental warming of a species-rich alpine meadow community on the Qinghai-Tibet Plateau. Biol Conserv, 2017, 213: 218–224
  - 28 Piao S L, Wang X H, Ciais P, et al. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006. Glob Chang Biol, 2011, 17: 3228–3239
  - 29 Fu G, Zhang H R, Sun W. Response of plant production to growing/non-growing season asymmetric warming in an alpine meadow of the Northern Tibetan Plateau. Sci Total Environ, 2019, 650: 2666–2673
  - 30 Liu H, Mi Z, Lin L, et al. Shifting plant species composition in response to climate change stabilizes grassland primary production. Proc Natl Acad Sci USA, 2018, 115: 4051–4056
  - 31 Jia J, Cao Z, Liu C, et al. Climate warming alters subsoil but not topsoil carbon dynamics in alpine grassland. Glob Change Biol, 2019, 25: 4383–4393
  - 32 Dong Q M, Zhao X Q, Ma Y S, et al. Influence of grazing on biomass, growth ratio and compensatory effect of different plant groups in *Kobresia parva* meadow (in Chinese). Acta Ecol Sin, 2012, 32: 2640–2650 [董全民, 赵新全, 马玉寿, 等. 放牧对小嵩草草甸生物量及不同植物类群生长率和补偿效应的影响. 生态学报, 2012, 32: 2640–2650]
  - 33 Zhang Y F, Yang X X, Dong Q M, et al. Effects of mixed grazing of yak and Tibetan sheep on feed intake of grazing livestock and plant compensation growth (in Chinese). Acta Agrestia Sin, 2019, 27: 1607–1614 [张艳芬, 杨晓霞, 董全民, 等. 牦牛和藏羊混合放牧对放牧家畜采食量和植物补偿性生长的影响. 草地学报, 2019, 27: 1607–1614]
  - 34 Li S, Dong S, Shen H, et al. Different responses of multifaceted plant diversities of alpine meadow and alpine steppe to nitrogen addition gradients on Qinghai-Tibetan Plateau. Sci Total Environ, 2017, 688: 1405–1412
  - 35 Ganjurjav H, Zhang Y, Gornish E S, et al. Differential resistance and resilience of functional groups to livestock grazing maintain ecosystem stability in an alpine steppe on the Qinghai-Tibetan Plateau. J Environ Manage, 2019, 251: 109579
  - 36 Zhang C, Dong Q, Chu H, et al. Grassland community composition response to grazing intensity under different grazing regimes. Rangeland Ecol

- Manage, 2018, 71: 196–204
- 37 Dong S, Shang Z, Gao J, et al. Enhancing sustainability of grassland ecosystems through ecological restoration and grazing management in an era of climate change on Qinghai-Tibetan Plateau. *Agric Ecosyst Environ*, 2020, 287: 106684
- 38 Dong Q M, Zhou H K, Shi J J, et al. Quantitative health evaluation and the technology integration and demonstration of production-ecological function promotion of alpine grassland (in Chinese). *Qinghai Sci Technol*, 2018, 25: 15–24 [董全民, 周华坤, 施建军, 等. 高寒草地健康定量评价及生产——生态功能提升技术集成与示范. 青海科技, 2018, 25: 15–24]
- 39 He J S, Bu H Y, Hu X W, et al. Close-to-nature restoration of degraded alpine grasslands: Theoretical basis and technical approach (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 3898–3908 [贺金生, 卜海燕, 胡小文, 等. 退化高寒草地的近自然恢复: 理论基础与技术途径. 科学通报, 2020, 65: 3898–3908]
- 40 Dong Q M, Ma Y S, Yang X X, et al. The theory and the implementation of the alpine grassland adaptive management on the Qinghai-Tibetan Plateau (in Chinese). *Qinghai Sci Technol*, 2021, 28: 18–21, 26 [董全民, 马玉寿, 杨晓霞, 等. 高寒草地适应性管理理论和实践. 青海科技, 2021, 28: 18–21, 26]
- 41 Yu H, Kong B, Wang G, et al. Hyperspectral database prediction of ecological characteristics for grass species of alpine grasslands. *Rangel J*, 2018, 40: 19–29
- 42 Zhang A W, Yan W Y, Guo C F. Inversion model of pasture crude protein content based on hyperspectral image (in Chinese). *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2018, 34: 188–194 [张爱武, 鄢文艳, 郭超凡. 基于高光谱图像的牧草粗蛋白含量反演模型. 农业工程学报, 2018, 34: 188–194]
- 43 Yan Q, Ding L, Wei H, et al. Body weight estimation of yaks using body measurements from image analysis. *Measurement*, 2019, 140: 76–80

Summary for “青藏高原高寒草地适应性管理释义: 概念及实现途径”

# The perception of the alpine grassland adaptive management on the Qinghai-Tibetan Plateau: The concept and its implementation

Xiaoxia Yang<sup>1</sup>, Xinquan Zhao<sup>2</sup>, Quanmin Dong<sup>1\*</sup>, Yang Yu<sup>1</sup>, Wenting Liu<sup>1</sup>, Chunping Zhang<sup>1</sup> & Quan Cao<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Qinghai Provincial Key Laboratory of Adaptive Management on Alpine Grassland, Qinghai Academy of Animal Science and Veterinary Medicine, Academy of Animal Science and Veterinary Medicine, Qinghai University, Xining 810016, China;

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining 810016, China

\* Corresponding author, E-mail: [qmdong@qhu.edu.cn](mailto:qmdong@qhu.edu.cn)

The alpine grassland is a unique and ecologically important habitat found in mountainous regions across the world, typically at elevations above the tree line. As the largest ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau, the alpine grassland plays the principal roles as the key component of strategies aimed at protecting the ecological environment, enhancing ecological livestock husbandry activities, and promoting the preservation of pastoral nationality and their nomadic culture. Accordingly, the alpine grassland has been considered to be an important region for ecological civilization highland construction on the Qinghai-Tibetan Plateau. However, the alpine grassland has witnessed a significant level of serious degradation since the 1990s, due to its inherent vulnerability and sensitivity to global changes and human activities. Studies have provided evidence that there are numerous environmental and development issues, such as deterioration of soil physicochemical properties, reduction in high quality forage, disrupted ecosystem structure, decrease in ecological and productive functions. Traditional grassland management systems that focused on production of livestock faced great challenges with regard to their capacity to effectively maintain the balance between ecological protection and livestock husbandry development. Therefore, it is urgent to establish and implement new management concepts and more robust, sustainable and environmentally friendly management measures which can ensure a sustainable stability of alpine grassland structure and function, while promoting the development of animal husbandry. At the very beginning of the 21st century, the thought of adaptive management was introduced into grassland management, however, it has not formed a clear and definite concept of grassland adaptive management, and this has hindered the development of grassland management theory and technology. Based on the thought of adaptive management, this paper defines the concept of the alpine grassland adaptive management by integrating the results and findings from previous fundamental studies and applied technology investigations on alpine grassland on the Qinghai-Tibetan Plateau since the 1980s. The alpine grassland management concept as discussed by scientists in the past decade is also described. The alpine grassland adaptive management is defined as a dynamic management process which is based on the type and current status of alpine grassland, and follows the structure of each interface in the “soil-plant-biology” system processes and laws, fully considering the complexity and variability of environmental factors (climate change and human activities), and aiming at structural stability, continuous output of ecosystem services and functions, that is, the sustainable development of alpine grassland as the goal. Thus, this paper, which expounds on the concept and implementation of the adaptive management of the alpine grassland on the Qinghai-Tibetan Plateau from three aspects: Actual demands, theoretical basis and implementing approaches, provides adaptive and effective solutions to the urgent demands in the management of the alpine grassland on the Qinghai-Tibetan Plateau.

**Qinghai-Tibetan Plateau, alpine grassland, adaptive management, scientific concept, implementation**

doi: [10.1360/TB-2022-0893](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0893)