

总 序

绿洲指在荒漠背景基质上，以小尺度范围内具有相当规模的生物群落为基础，构成能够稳定维持的、具有明显小气候效应的异质生态景观，多呈条、带状分布在河流或井、泉附近，以及有冰雪融水灌溉的山麓地带。绿洲土壤肥沃、灌溉条件便利，往往是干旱地区农牧业发达的地方。我国绿洲主要分布在贺兰山以西的干旱区，是干旱区独有的地理景观，为人类的生产和生活提供基本的能源供应和环境基础，也是区域生态环境保持稳定的重要“调节器”，其面积仅占西北干旱区总面积的4%~5%，却养育了西北干旱区90%以上的人口，集中了西北干旱区95%以上的工农业产值和资源。

近年来，随着人类活动增强，绿洲数量、规模和空间分布发生了显著改变，其生态系统功能也发生了不同程度的变化，这种变化不仅反映了人类对于干旱区土地的利用开发程度，更是对干旱区生态与资源环境承载力等问题的间接反映。人类活动对绿洲的影响包括直接影响和间接影响两个方面，直接影响主要是指人为对绿洲进行开发，导致水资源时空分布发生改变，从而导致绿洲和其他土地类型之间发生转变；间接影响是指地下水资源的过度开采，导致地下水资源不足，使得天然绿洲退化、土地荒漠化，而大量修建平原水库、灌溉干渠和农田漫灌，又使地下水位抬升，产生次生盐渍化和返盐现象，对绿洲的发展造成不利影响。因此科学分析和掌握绿洲的发展变化过程及由此产生的绿洲农业资源开发与环境问题、绿洲城镇格局演变与乡村聚落变迁、绿洲景观生态风险与安全、绿洲水土资源空间演变与空间优化配置等问题，对绿洲合理开发利用和实现绿洲生态环境持续健康发展具有重要的现实意义。

“绿洲科学丛书”是围绕干旱区绿洲变化和生态保护，实现干旱区绿洲高质量发展系列研究成果的集成。丛书试图从不同角度剖析干旱区绿洲在开发利用过程中的城镇发展格局与优化、乡村振兴与多元治理、农业资源利用与区划、绿洲生态安全与风险防控、绿洲土壤污染与修复、绿洲大数据平台开发与应用等关键问题，并从理论高度予以总结提升。该丛书的价值和意义在于，通过总结干旱区绿洲生产-生活-生态存在的问题及内在动因，探究绿洲社会经济发展与生态环境保护的协调关系，提炼绿洲区高质量发展和生态文明建设的实践与案例，提供有效防范因绿洲社会经济发展和资源环境的矛盾而引发的区域生态环境风险的应对及优化策略，提出解决绿洲城镇、乡村、农业、生态、环境统筹协调发展

问题的新模式，为我国干旱区发展建设提供先行示范。

丛书致力于客观总结干旱区绿洲社会经济发展和生态文明建设的成绩与不足，力图为实现区域绿色发展，构建绿洲人与自然和谐共生提供理论依据与实践案例。丛书可为区域城乡规划管理、生态环境修复与治理、资源空间布局与优化等领域的专家学者和各级政府决策者提供干旱区绿洲高质量发展与生态文明建设的科学参考。



2024 年 5 月

前言

绿洲，作为我国西北干旱区人类生存与发展的核心载体，其生态系统的稳定与安全是区域可持续发展的根本基石。随着我国工业化进程的深入推进，绿洲城市的经济实现了历史性跨越，但与此同时，其脆弱的生态环境也承受了前所未有的压力。其中，由工业活动引发的土壤有机污染问题因具有隐蔽性、持久性与高风险性而成为制约绿洲城市实现高质量发展的关键瓶颈。在此背景下，本书围绕“污染—风险—技术”的核心逻辑链条展开系统论述，旨在为这一重大环境挑战提供一个从问题识别到解决方案的完整科学框架。

本书在系统梳理绿洲城市发展背景、污染特征与生态危害的基础上，通过两大实证研究，系统揭示全氟、多氟烷基化合物（PFAS）和多环芳烃（PAHs）在农田“土壤-蔬菜”系统中的污染特征、迁移规律与健康风险，并深入阐明铁络合类芬顿（Fenton）高级氧化技术修复多氯联苯（PCBs）污染的性能、机理及关键影响因素。最终，本书立足于绿洲生态的脆弱性，提出破解“绿洲困局”的工业有机污染防治与土壤安全策略。

本书共 10 章，其内容与结构安排如下：第 1~3 章系统介绍我国绿洲城市的工业发展背景、典型土壤类型，以及主要工业有机污染物的来源、分类及其对人体健康和土壤生态环境的危害。其中，第 1 章和第 2 章的主要撰写人为马晓红，第 3 章的主要撰写人为马晓红和王晨雯。第 4~6 章以 PFAS 和 PAHs 为研究对象，系统揭示其在绿洲农田“土壤-蔬菜”系统中的污染特征、富集迁移规律，并构建多介质、多途径的健康风险评价体系。其中，第 4 章和第 5 章的主要撰写人为杨小丽，第 6 章的主要撰写人为曹春。第 7~9 章在对主流修复技术进行系统筛选的基础上，以修复典型的持久性有机污染物（POPs）——PCBs 为例，深入阐明铁络合类芬顿高级氧化技术的修复性能、作用机理、环境效应及其关键影响因素，主要撰写人为马晓红。第 10 章在总结本书研究的基础上，提出破解“绿洲困局”的工业可持续发展与土壤安全保障策略，主要撰写人为马晓红。本书由马晓红拟纲、统稿、修改、定稿。

本书的撰写与出版，得到了多方的支持与帮助。在成书过程中，曹春、赵福正、王晨

雯、杨小丽、杨丽琴、董元华、赵玲、郭一凡、吕贞英、唐千惠、孙丽婷、屠伟弟、姜琨、张钰婷、张晓玥、丁晓东、毛向东等同志付出了辛勤的劳动。本书的核心研究工作得到了国家自然科学基金委员会地球科学部和西北师范大学的大力资助，在此我们表示最诚挚的感谢！

由于作者水平有限，本书难免存在疏漏与不足之处，恳请广大读者同仁批评指正。

马晓红

西北师范大学

2025 年 12 月

目 录

总序	
前言	
第 1 章 我国绿洲城市工业发展及背景	1
1.1 我国绿洲区域分布概况	1
1.2 绿洲城市的工业发展	9
1.3 绿洲城市的工业类型	17
第 2 章 我国绿洲城市工业有机污染土壤	23
2.1 绿洲城市土壤类型	23
2.2 绿洲城市工业有机污染物的类型	29
2.3 绿洲城市工业有机污染土壤的现状与评价	39
第 3 章 工业有机污染物的危害	44
3.1 工业有机污染对人体健康的危害	44
3.2 工业有机污染物对土壤生态环境的危害	56
第 4 章 典型绿洲城市农田土壤中 PFAS 和 PAHs 污染特征	62
4.1 研究区概况	62
4.2 典型绿洲城市农田土壤中 PFAS 污染特征	63
4.3 典型绿洲城市农田土壤中 PAHs 污染特征	70
第 5 章 绿洲城市农田土壤-蔬菜系统中 PFAS 和 PAHs 的富集与迁移特征	77
5.1 不同浇灌方式下蔬菜中 PFAS 的富集与迁移特征	77
5.2 不同种类蔬菜种植下 PFAS 富集迁移特征及影响因素	85
5.3 不同种植方式下蔬菜中 PAHs 的富集与迁移特征	96
第 6 章 绿洲城市农田土壤-蔬菜系统中 PFAS 和 PAHs 的健康风险评价	112
6.1 绿洲城市农田土壤-蔬菜系统中 PFAS 的健康风险评价	112
6.2 绿洲城市农田土壤-蔬菜系统中 PAHs 的源解析及生态健康风险评价	119
第 7 章 工业有机污染土壤生态修复技术筛选	126
7.1 有机污染土壤生态修复技术	126
7.2 重点修复技术介绍与筛选理由	132
第 8 章 铁络合类芬顿氧化法修复多氯联苯污染土壤的应用	139
8.1 铁络合类芬顿氧化法修复多氯联苯污染土壤的性能	139

8.2	铁络合类芬顿氧化法修复多氯联苯污染土壤的机理研究	146
8.3	铁络合类芬顿体系修复后的土壤环境效应	152
第9章	铁络合类芬顿氧化法修复多氯联苯污染土壤的影响因素	158
9.1	环境因素的影响	158
9.2	无机离子的影响	163
9.3	有机组分的影响	171
第10章	绿洲城市工业有机污染综合防控与土壤生态安全调控策略	182
10.1	绿洲城市土壤生态安全的核心约束与脆弱性解析	182
10.2	绿洲城市土壤安全保障的策略体系构建	186
10.3	策略实施的路径：近期政策建议与中长期战略展望	189
	参考文献	191
	附表	215
	附录1	220
	附录2	232

我国绿洲城市工业发展及背景

自然地理环境，作为一种基础性的空间载体，深刻地塑造着人类文明的演进轨迹。在生产水平相对有限的历史阶段，地理环境通过其资源禀赋、气候条件和生态承载力等要素，直接制约着人口集聚与聚落发育的时空格局，尤其在生态系统极为脆弱的干旱地带，自然条件对人类活动的限制效应表现得更为显著——只有在水热组合条件相对优越、适宜农牧业发展的绿洲区域，才可能孕育出持续性的定居文明，并逐步演化为具备复杂社会功能的城市体系。

我国西北干旱半干旱区因具有独特的地貌格局与大气环流特征，形成了全球范围内罕见的陆表生态系统。青藏高原隆升所形成的“雨影效应”，叠加西风环流被天山—祁连山系等巨大山脉抬升与阻隔，导致该区域年均降水量普遍低于 200mm，呈现出典型的荒漠—戈壁景观。在此严苛的生态阈值约束下，人类的定居与发展呈现出显著的“绿洲依赖性”特征。

绿洲，作为干旱半干旱区独特的人地耦合系统，其形成与演化遵循独特的生态动力学机制。由高山冰川融水补给并在山前冲积扇缘形成的潜水溢出，为绿洲的发育提供了稳定的水源保障；以胡杨、柽柳等为代表的荒漠原生植被所构建的生态屏障，有效地遏制了风沙侵蚀。随着绿洲地区人类生产与生活活动的聚集，区域功能逐渐分化并向更大范围辐射，最终形成了绿洲城市。这些城市不仅是人口的集中地，更承担着区域政治、经济、文化等多重核心职能。它们可大致划分为两类：一类是以传统绿洲农业为经济基础的城市，另一类是以工业、矿业资源开发和交通枢纽功能为主导的城市。

绿洲城市的空间扩展和工业发展深受其自然禀赋的影响，因此系统研究绿洲城市的工业发展现状及其驱动机制，不仅有助于深化对干旱半干旱区自然资源利用格局的理解，更能为推动西北绿洲城市的工业经济实现持续健康发展提供决策支持。本研究旨在引导绿洲城市向更为绿色、合理的工业技术与产业模式转型，最终实现经济增长与生态保护的协同发展，在加速区域经济增长的同时，保障生态环境的长期可持续性。

1.1 我国绿洲区域分布概况

1.1.1 绿洲的形成和发展

我国西北干旱半干旱区作为国土面积最广阔的生态脆弱区，在国家的社会经济发展

与文化延续中占据着举足轻重的战略地位。在全球气候变暖与人类活动的双重胁迫下，该区域的“绿洲化”与“荒漠化”过程交替频繁，生态环境基底极为脆弱，是全球气候变化响应最为敏感的地区之一。自 21 世纪以来，西北干旱区的年均温度呈现显著上升趋势，气候的暖湿化转变加速了高山冰川的消融，深刻地改变了区域水循环过程。然而，干旱化的总体趋势与水资源时空分布格局的重塑依然严重威胁着该区域生态系统的稳定性。在我国广袤的西北地区，绿洲面积占比不足 5%，却承载了超过 95% 的人口与绝大部分的社会经济活动，是该地区人地关系与经济发展格局最直接的体现。绿洲与荒漠相伴共生，其兴衰存亡直接关系到整个干旱半干旱区的发展和演化，还影响人类未来生存空间的可持续性。

绿洲的演变是一个受自然因素与人文因素共同驱动的复杂过程，二者间的交互作用对绿洲动态变化的解释力远超单一因素。在百万年的地质时间尺度上，自然因素无疑是主导绿洲宏观格局的根本力量；然而，在近百年的历史尺度上，自然因素更多的是作为绿洲发展与衰败的宏观背景与客观约束条件，人文因素则上升为决定绿洲兴衰的关键驱动因素。

(1) 自然因素

1) 水文条件。绿洲生态系统具有高度的“水依赖性”，因此水资源的分布格局与可利用程度是决定绿洲时空分布的核心要素。区域内可开采利用的地表水与地下水资源总量、空间分布及其动态变化直接影响绿洲的扩张与退缩趋势。在干旱地区，由于降水稀少而蒸发强烈，植物生长所需的水分主要依赖地表径流与地下水的补给。沿河分布的区域，其地下水位通常较高，水分可通过毛细作用上升至地表，为植物生长提供水源。因此，当河流发生改道时，旧河道下游的绿洲常因水源中断而衰退；在新河道的两侧，充足的水源会迅速催生新的绿洲生态系统。

2) 气候变化。气候的长期变化，通过其对区域水文循环的深刻影响，直接作用于绿洲的兴衰。例如，区域气候向干旱化方向的转变将直接导致水源补给量减少，进而引发绿洲面积的萎缩和沙漠化进程的加剧。然而，需要指出的是，在十年乃至百年的较短时间尺度内，气候的自然波动幅度相对有限，尚不足以对绿洲的长期演化趋势产生决定性影响。

3) 地质地貌。地貌单元的类型及其土壤条件共同构成了绿洲发育的物质基础。适宜的地貌条件与良好的土壤质地是绿洲得以形成与发展的先决条件。例如，由壤土、沙壤土等细颗粒物组成的冲积平原因地下水位较浅、土壤盐分含量较低而极适宜农业发展；相比之下，由沙砾等粗大颗粒物堆积而成的洪积扇因水分易下渗至深部，地表难以维持植被生长。

4) 沙漠扩展。在沙源丰富、风沙活动频繁的区域，沙丘的活化与移动会导致流沙掩埋绿洲，从而加剧区域的荒漠化。必须认识到，“绿洲化”与“荒漠化”是干旱区生态系

统中并存且相互作用的双向过程。一方面，绿洲化能够改善局部微气候、改良土壤，从而扩大人类的生存空间；另一方面，不合理的水土资源开发或剧烈的自然环境变化均可能降低绿洲生态系统的稳定性，进而触发或加速不可逆的荒漠化进程。例如，新疆玛纳斯河流域就曾因地下水位的持续下降而出现大面积耕地退化为沙漠的情况，这给人们留下了深刻的历史教训。

(2) 人文因素

1) 人口增长与社会稳定。西北绿洲以其相对充沛的水源和肥沃的土地，为人类的生存与发展提供了宝贵的空间。随着人口在绿洲内部的持续集聚，耕地不断被开垦，人工绿洲的建设极大地推动了绿洲的整体发展。然而，人口的过度增长也可能超出绿洲的承载力，导致生产力下降，并最终引发一系列生态退化问题，如植被破坏、草场退化和土地沙漠化等。社会稳定是绿洲实现可持续发展的根本保障。从历史上看，虽然战乱和瘟疫对绿洲造成了严重的破坏，但只要灌溉系统未被彻底摧毁，被破坏的绿洲通常仍能恢复生机。例如，1912~1949年，河西地区政局动荡导致屯垦活动一度衰落；但在中华人民共和国成立后，稳定的政治环境极大地促进了该地区耕地面积与人口数量的快速增长，使其发展成为国家重要的商品粮基地。

2) 生产方式与技术变革。不同的生产方式会对土地利用格局产生截然不同的影响。农业生产高度依赖水利设施的支撑，以建设和维持人工绿洲；传统牧业依赖天然草场的承载力进行放牧。随着水利技术的不断进步，水库等大型水利工程的建设深刻地改变了干旱区水系的时空分布特征，从而重塑了绿洲的时空演化格局。与此同时，生产工具的革新也极大地提升了土地的开发效率。

3) 政策驱动与资源利用。国家与地方政策对绿洲的演变具有至关重要的导向作用。例如，“退耕还林还草”等生态环境保护政策能够有效改善天然绿洲的生态环境，并提升人工绿洲的综合生产能力。节水政策有助于缓解日益严峻的水资源压力，促进绿洲的可持续发展。需要区分的是，分水政策不同于节水政策：节水政策旨在通过提高用水效率、减少浪费降低总耗水量；分水政策侧重在流域尺度上对水资源进行合理分配，以满足不同区域和行业的用水需求，确保生态用水得到保障，从而显著改善下游区域的水生态环境。然而，不合理的政策也可能导致负面效果。在干旱区，若缺乏有效的监管而过度开采地下水，将导致绿洲水资源的“逆差”，并最终引发生态系统的全面衰退。例如，河西走廊地区就曾因未能对水资源进行合理调配，其绿洲经济在快速发展的同时，伴生了严重的环境恶化问题。如图1-1所示，自21世纪以来，西北地区生态环境承载力与经济呈现出的高度相关性，这有力地说明了资源的合理利用与环境保护对区域经济的健康发展具有决定性作用。

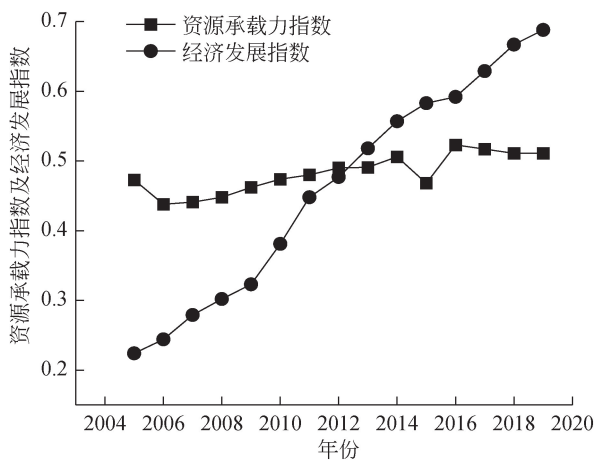


图 1-1 2005 ~ 2019 年西北地区生态环境承载力与经济发展的趋势

1.1.2 绿洲的特征和类型

1.1.2.1 绿洲的特征

(1) 系统性

绿洲并不是一个孤立存在的生态单元，而是与其周边环境（如山地、荒漠）构成了一个有机的、紧密联系的地理系统。它深刻地受到区域地形地貌、水文循环及气候条件等多重因素的综合影响，该地理系统中任何一个环节的变动，都可能对其景观状态产生连锁反应。以我国西北干旱半干旱区的绿洲为例，区域尺度的气候变化、高山冰川的消融速率、山地中上游的植被涵养能力以及区域的地质构造背景，均是对下游绿洲生态系统产生深刻影响的关键变量。

(2) 高度的水依赖性

水资源是维系绿洲存在的“生命线”，其空间分布格局与时间变率直接决定了绿洲的规模、形态及其未来的演化方向。绿洲的发育在地貌上通常与稳定的水源供给区（如河流、地下水溢出带）表现出高度的空间耦合性，水资源的丰枯周期会直接引发绿洲边界的扩张或收缩。从水文地理学的视角来看，绿洲本质上是干旱区水文过程在地表所形成的“资源岛”，其生态系统的承载力严格受限于区域水资源总量及其利用效率。

(3) 尺度性

绿洲的规模对其自身的稳定性与自我维持能力具有重要影响。尺度过小的绿洲通常难以形成一个能够自我维持并展现其典型景观特征的完整植被生态系统。另外，区域的地理结构与水源补给机制通常也限制了其向过大尺度的无序扩张。绿洲的最终规模是受到区域

地理、气候及水源等多重因素共同约束的结果。也正因如此，不同地貌单元孕育的绿洲表现出迥异的特征，形成了如山地绿洲、河谷绿洲、盆地绿洲、湖泊绿洲等各具特色的类型。

(4) 高效性

绿洲作为干旱区中特殊的自然资源富集区，兼具干旱区普遍拥有的优越光热资源，以及源自上游山地湿润气候区相对丰富的水资源，这“水热组合”的双重优势使其在农业生产与生态系统功能等方面均表现出极高的效率。例如，我国河西走廊的绿洲长期以来一直是国家重要的高产农业区的杰出代表。

(5) 脆弱性

绿洲生态系统具有高度的脆弱性，其内在稳定性较差，因而极易受到气候变化、地质变迁及不当人类活动的干扰而发生退化。在世界历史上，已有多多个古代文明因其所依赖的绿洲发生退化而最终衰落。绿洲生态系统对环境变化的响应极为敏感，即使是微小的环境扰动，也可能触发其退化过程，一旦退化，其恢复过程会相对漫长且艰难。

(6) 演化性

绿洲并不是静止不变的景观，而是一个处于持续动态演化中的地理实体。它经历了从原始绿洲、古代绿洲到近代绿洲，再到现代人工绿洲的逐步演化过程。在这一漫长的历程中，人类活动，尤其是农业开发、城市化进程及社会经济的不断发展，对绿洲的形成与发展产生了日益深远的影响，并在一定程度上提升了绿洲的稳定性与多功能性。然而，必须清醒地认识到，绿洲的退化过程通常要比其形成与演化过程迅速得多，要恢复一个已退化的绿洲，其所需的时间与投入远超其衰退过程本身。已有研究表明，恢复一个在短期（1~3年）发生退化的绿洲，通常需要长达15~20年的持续治理与生态修复工作。

1.1.2.2 绿洲的类型

(1) 按绿洲所处的地理位置和气候条件分类

1) 热带-亚热带绿洲。该类绿洲主要分布在副热带高压带及信风带控制的大陆腹地，地理位置介于 $15^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$ ，代表性区域包括北非、西南亚、中美洲、澳大利亚及阿根廷等地。其气候特征表现为日照极为强烈，年日照时数可达4000h；气温高，年均气温通常高于 18°C ，部分地区年均气温甚至常年高于 25°C ；降水稀少，年均降水量一般低于250mm，且空气相对湿度极低，通常不足30%。

2) 温带内陆绿洲。该类绿洲主要分布于亚欧大陆中部和北美大陆西部的山间盆地与高原地带，地理位置介于 $35^{\circ}\text{N} \sim 45^{\circ}\text{N}$ 。其气候特征为典型的温带大陆性气候，表现为气候干燥，冬季寒冷，夏季炎热，气温年较差与日较差均较大。年均降水量通常在250mm以下，但冬季会有少量降雪，这是其与热带-亚热带绿洲在气候上的一个显著区别。

我国西北地区的内陆荒漠区的气候特征与温带内陆绿洲高度相似。区域内的巨大山脉

(如天山、祁连山)能够有效截获由高空西风及东南季风带来的水汽,从而显著增加了山区的降水量,形成了重要的“固体水库”。每到夏季,高山冰雪消融形成径流,一部分渗入地下补给地下水,另一部分挟带大量泥沙形成地表径流,在山前地带塑造出戈壁、冲积扇、洪积平原等独特的地貌景观。人类正是通过引水灌溉、种植农作物、植树造林等一系列活动,利用这些宝贵的水土资源,发展出了辉煌的灌溉农业文明,并形成了独特的绿洲文化。

(2) 按地表径流及地貌部位分类

1) 扇形地貌绿洲。当山谷中的河流或季节性洪流挟带大量碎屑物质,从狭窄的山谷流入开阔的荒漠地带时,因其流速骤减,物质便在出山口处堆积,形成扇形的洪积扇或冲积扇。这些扇形地的土壤质地从扇顶至扇缘呈现出由粗变细的规律性分异。在扇形地的中下部,因其水源补给丰富、土层深厚且地下水埋深适中,通常植被生长茂盛,形成生态系统发育良好的绿洲。在此类绿洲中,地下水交替通畅,水质优良,极少受土壤次生盐渍化的威胁。扇形地貌绿洲通常紧邻河流出山口,其典型代表包括昆仑山北麓、天山南北坡以及祁连山北麓的绿洲,如甘肃河西走廊的武威、张掖、酒泉、嘉峪关,以及新疆的喀什、和田、阿克苏、库尔勒、乌鲁木齐等地。

2) 冲积平原型绿洲。该类绿洲主要分布在水量丰沛的大中型内陆河两岸的阶地上,形态上常呈长条状。大中型河流的上游河段多为下切侵蚀河道,进入中下游地区后,由于地势坡度减缓,水流速度变慢,河流的沉积作用显著增强,导致河床不断抬高,形成多分叉的游荡性河道。这些河道在洪水季节的泛滥与沉积作用,逐渐塑造出广阔的冲积平原,成为古代绿洲分布的核心区域之一。例如,河西走廊黑河沿岸的临泽绿洲和高台绿洲,疏勒河沿岸的安西绿洲,以及塔里木河流域的诸多南疆绿洲,均属此类。

3) 三角洲型绿洲。该类绿洲通常发育在大中型内陆河的三角洲区域,尤其在河流汇入湖泊或内陆封闭水体时所形成的三角洲地带。其形成机制与扇形地貌绿洲有相似之处,表现为地势平坦,易引水灌溉。然而,其水源供给的稳定性较差,极易受到河流改道或上游人类活动的剧烈影响。三角洲型绿洲的典型代表包括甘肃河西走廊石羊河下游的民勤绿洲、黑河下游额济纳旗的古居延绿洲,以及新疆孔雀河下游罗布泊地区的古楼兰绿洲等。

(3) 按其发展历史分类

1) 原始绿洲阶段。绿洲的最初形态是在自然条件极为严酷的荒漠地带,由自然过程形成的天然绿洲。早期人类正是被这些具备稳定水源、植被和草地的“湿岛”吸引,开始定居并形成原始部落。在该阶段,人类主要通过渔猎、采集或最原始的耕作活动,选择性地适应并利用绿洲资源,从而逐渐成为影响绿洲发育和演化的重要因素。考古学研究已证实,早在新石器时代,随着原始农业的出现,人类就已在我国西北干旱区的绿洲地带定居并从事农业生产。

2) 古绿洲阶段。随着生产力水平的提升,人类社会从以狩猎为主的原始经济形态过

渡到以灌溉农业为主的定居经济形态，对绿洲的开发深度与广度增大，绿洲的生态环境发生了显著变化，特别是“丝绸之路”的开通，不仅极大地促进了东西方商品、文化与技术的交流，更有力地推动了绿洲地区的城市化进程。在该阶段，绿洲农业不仅满足了定居人口的基本生存需求，还为长途商旅提供了食物、商品和服务，从而带动了农业、手工业、商业及服务业的初步分化与发展。西汉时期，中央政府实施的移民屯垦政策极大地推动了农业生产的发展，尤其在甘肃河西走廊、新疆等地，“寓兵于农”的策略进一步促进了绿洲的扩展与农业生产力的提升。历史上著名的“西域三十六国”实际上是当时分布在塔里木盆地周缘的36个重要的绿洲城邦，它们在区域的经济、文化和军事格局中扮演了举足轻重的角色。

3) 老绿洲阶段。我国西北干旱半干旱区的绿洲拥有悠久的开发历史。随着农业技术的不断进步和人口的持续增长，绿洲的面积逐渐扩大，水资源的开发也逐步从早期的“有余”状态转变为“饱和”状态，特别是随着绿洲农业的集约化和规模化发展，绿洲的生态与社会经济系统进入了一个鼎盛时期。此时，绿洲的发展不再单纯依赖传统的、小规模的水资源管理模式，而是通过兴建大规模的水利工程、优化农业生产结构等一系列措施，促进了农业经济的快速增长和社会的全面繁荣。

4) 新绿洲阶段。中华人民共和国成立以后，西北地区的工业、农业、商业、国防、交通及文教卫生等各项事业均迎来了前所未有的发展机遇。随着国家对边疆地区的大力支援，大量人口从东部稠密区向西移，加之商品粮基地建设和大规模农田水利化措施的实施，区域的用水类型与用水规模均实现了突飞猛进的增长。在该阶段，绿洲水土资源的开发强度与广度远超历史上任何一个时代。

(4) 按成因和水源类型分类

1) 山地绿洲：该类绿洲主要分布于山区，其水源补给以山泉、高山冰雪融水为主。该类绿洲常见于大型山脉的山前地带或山间盆地，如天山北麓的伊犁河谷绿洲、祁连山北麓的张掖绿洲等。

2) 河谷绿洲：该类绿洲沿河流两岸分布，水源主要来自流域内的河流径流，通常发育在内陆河流的冲积平原或河谷阶地上，水源供应稳定且直接，极适宜农业发展和人类定居，典型的如河西走廊的武威绿洲、酒泉绿洲等。

3) 盆地绿洲：该类绿洲分布于大型盆地内部，其水源补给主要依赖地下水，如塔里木盆地的吐鲁番绿洲、喀什绿洲等。

4) 湖泊绿洲：该类绿洲分布于湖泊周边，主要以湖泊水为水源，多见于盐碱湖或内陆湖地区，如青海湖绿洲、居延海绿洲等。

1.1.3 绿洲的分布范围与规律

我国西北地区地处欧亚大陆腹地，气候干旱少雨，大部分区域属于典型的温带大陆性

气候或高原山地气候，表现为降水稀少而蒸发强烈，是全球著名的干旱中心之一。然而，正是在这片广袤的干旱区中，星罗棋布地分布着众多绿洲，它们宛如镶嵌在沙漠中的“绿色宝石”，为整个区域赋予了无限生机。

从宏观上看，我国的绿洲主要分布于 36°N 以北、 110°E 以西的广阔地域，其范围涵盖柴达木盆地等西北干旱区的绝大部分荒漠与半荒漠地区。从各省区的绿洲分布面积来看，新疆的绿洲面积最为广阔，约占我国绿洲总面积的 68%；其次是甘肃的河西走廊，约占我国绿洲总面积的 13%，其余如青海、内蒙古、宁夏等省区的绿洲面积相对较小。

1.1.3.1 绿洲分布范围

绿洲作为干旱区内部地域分异的独特产物，是一个复杂的、远离平衡态的耗散结构系统。它与山地、荒漠共同构成了我国干旱区的三大核心地理系统，是干旱区生态与经济价值最为精华的部分。我国的绿洲集中分布在祁连山和昆仑山的北麓、天山山脉的南北麓，以及黄河流经的河套平原地区，形成了数条纵深达数百公里乃至上千公里的巨型绿洲带。在其他广大的荒漠地区，绿洲多呈零星、散点状分布，且面积普遍较小。根据地形地貌与绿洲分布的宏观特征，我国的绿洲可被划分为以下几个主要的亚区。

1) 北疆绿洲分布区。该区主要包括准噶尔盆地和额敏盆地。绿洲集中分布于天山北麓，尤其在奇台至乌苏之间的洪积—冲积平原地带，绿洲面积最为广阔，著名的石河子垦区即坐落于此。此外，在巴里坤、伊吾、福海、塔城、额敏等地也有较大面积的绿洲分布。

2) 南疆绿洲分布区。该区主要包括塔里木盆地和吐鲁番—哈密盆地。绿洲主要沿盆地的北缘及南缘西段呈带状分布，核心绿洲有阿克苏、喀什、哈密等。该区的绿洲以种植业为主，拥有极为悠久的开发历史，其开发历史甚至可追溯至新石器时代。中华人民共和国成立后，绿洲面积得到了进一步的恢复与扩大。

3) 伊犁谷地绿洲分布区。该区绿洲开发历史悠久，因其独特的地形（向西开口的“喇叭口”），能够接纳来自大西洋的水汽，因而水源丰富，土质肥沃，较少受到干旱和风沙等自然灾害的侵袭，是新疆最为富庶的绿洲地区，以农牧业为主导产业。

4) 河西绿洲分布区。该区主要包括武威—民勤、张掖—高台、酒泉—金塔、玉门镇—安西、敦煌等一系列绿洲，它们共同构成了祁连山北麓典型的山前绿洲带。这些绿洲以农业为主，但其中也不乏如玉门、嘉峪关、金川等以工业为主导的典型工业绿洲。该区地处古丝绸之路的咽喉要道，绿洲开发历史源远流长，中华人民共和国成立后又进行了大规模的拓垦，现已成为我国重要的工农业基地。

5) 阿拉善绿洲分布区。该区的绿洲呈现出典型的散点状分布格局，其范围西起哈顺戈壁，东至阿拉善高原及乌兰察布高原北部等地。绿洲集中在弱水下游的额济纳一带，以及巴丹吉林、腾格里沙漠中的湖泊洼地。此外，该区还广泛分布着由泉水或井灌形成的小

型绿洲。

6) 柴达木盆地绿洲分布区。该区的绿洲主要分布于盆地的东缘和南缘,绿洲面积相对较小,主要分布于格尔木、德令哈、乌兰、诺木洪等地,这些绿洲以农业或工农业混合型为主。其中,冷湖、茫崖、大柴旦等地是典型的工业绿洲。该区因高寒、风沙大、水资源稀缺、土地盐渍化严重等自然条件的限制,农业发展受到较大制约;但因拥有石油、有色金属、湖盐等矿产资源,工矿城镇相对较为发达。

7) 河套绿洲分布区。该区范围大致从宁夏中卫延伸至内蒙古包头附近,包括著名的宁夏平原(前套)和后套平原。该区绿洲开发历史悠久,平原地区自古便有“塞上江南”的美誉,同时分布着如包头、乌海等在中华人民共和国成立后兴建的重要工业城市。

1.1.3.2 绿洲分布规律

在荒漠生态系统中,绿洲的宏观分布严格受控于水源的空间配置特征。从水文地质学的结构来看,荒漠区的水源可被概括为线状水系(如常年性或季节性河流)与点-面状水系(包括泉、井、湖泊等)两种基本的赋存形态。这种差异化的水源赋存方式直接塑造了绿洲的两种典型空间分布模式。

1) 带状分布模式:依托线状的河流(尤其是出山口后的河段)而发育的绿洲,其空间形态通常呈现出沿河道串珠状的分布特征。当多个绿洲沿河道紧密相连时,便会形成纵向或横向延伸的绿洲带。其中,沿山麓地带洪积扇前缘发育的绿洲带是最为典型的形态。在大型盆地的边缘,绿洲带可能呈现出环状的分布格局。

2) 散点状分布模式:依托点状或面状水系而形成的绿洲,其空间形态呈现出典型的散点状或斑块状分布。例如,在我国的东疆和阿拉善等地区,由承压水上涌形成的泉、人工开采的井灌区,或内陆小湖泊所支撑的绿洲,均属该分布模式。需要指出的是,在某些区域,如东疆地区,绿洲的分布形态可能以带状为主,但同时也兼具散点状的特征,其最终的分布格局取决于区域水源分布与地形地貌条件的复杂组合。

1.2 绿洲城市的工业发展

1.2.1 绿洲城市的形成和发展

我国的绿洲城市集中分布在新疆和甘肃,在宁夏、内蒙古和青海等省区也有少量分布(表1-1)。在历史上,这些地区与中原地区在行政管理模式与自然环境禀赋上均存在显著差异,这些因素共同塑造了绿洲城市独特的发展轨迹与演变规律。总体来看,我国绿洲城市的发展历程大致可划分为形成期、成熟期和快速发展期三个阶段。

表 1-1 我国绿洲城市统计表 (单位: 个)

地区	城市名称	总计
新疆	地级: 乌鲁木齐市、克拉玛依市、吐鲁番市、哈密市	21
	县级: 昌吉市、阜康市、博乐市、库尔勒市、阿克苏市、库车市、喀什市、阿图什市、和田市、伊宁市、塔城市、乌苏市、阿勒泰市、石河子市、图木舒克市、阿拉尔市、五家渠市	
甘肃	地级: 张掖市、武威市、金昌市、嘉峪关市、酒泉市	5
宁夏	地级: 银川市、吴忠市、中卫市	3
内蒙古	地级: 巴彦淖尔市、鄂尔多斯市	2
青海	县级: 茫崖市、德令哈市	2

1. 2. 1. 1 绿洲城市的形成期 (先秦至清初)

从考古学与历史学的视角看, 我国的绿洲地区是人类活动最早的发源地之一。在汉代前, 西域及河西走廊地带的社会结构仍处于较为原始的阶段, 与中原地区存在显著差异。此时, 西北地区的城邦规模普遍较小, 彼此联系松散, 呈现出小国林立、相互割据的局面, 这在很大程度上阻碍了区域交通体系的发展, 未能形成后世贯通东西的交通干线。

进入两汉时期, 随着中央王朝对西部疆域的经略, 河西走廊、天山南北麓及昆仑山北麓地区逐渐形成了大面积的绿洲农业区, 城市初具规模, 城市间的交流也日趋频繁, 主要的交通线路 (丝绸之路的雏形) 逐渐形成。隋唐时期, 中央政府高度重视西北边疆地区的治理与发展, 投入了大量的人力与物力, 并长期派兵驻守, 确保了西北边疆地区的安宁与稳定, 为绿洲城市的繁荣奠定了基础。然而, 从五代至明朝, 绿洲城市在经历了唐代的快速发展后, 因频繁的战乱与经济重心东移, 进入了发展的瓶颈期。一方面是朝代更迭带来的政治动荡, 另一方面是自宋朝起, 海上丝绸之路的迅猛发展逐渐取代了陆上丝绸之路的地位, 使沿线绿洲城市的战略与经济价值相对下降。

1. 2. 1. 2 绿洲城市的成熟期 (清代至改革开放前)

从清朝中后期至中华人民共和国成立前, 河西走廊等地区社会持续动荡, 农业与手工业发展均受到重创, 城市发展几乎停滞。与此同时, 频发的自然灾害也进一步阻碍了新疆、宁夏、青海和甘肃等地城镇的正常发展。中华人民共和国成立后, 随着国家战略重心的西移, 西北地区迎来了重要的发展契机。区域的城镇体系逐步完善, 农牧业生产得到恢复与发展, 城市建设速度加快, 大规模的人工绿洲得以系统性地规划与建设。城市聚落相继建立, 城镇间的政治、经济和文化交流得到加强, 城市化进程显著提速, 现代绿洲城市的空间格局基本形成。然而, 需要指出的是, 该时期的城市建设在很大程度上是以满足军事和战略需求为导向的, 导致城市功能较为单一, 产业结构也缺乏应有的多样性。