

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2023.03.11

引用格式: 毕奔腾, 许琦, 杨辰. 缅甸地下水赋存特征与水环境问题分析[J]. 中国地质调查, 2023, 10(3): 95-101. (Bi B T, Xu Q, Yang C. Analysis of groundwater occurrence characteristics and water environment issues in Myanmar [J]. Geological Survey of China, 2023, 10(3): 95-101.)

缅甸地下水赋存特征与水环境问题分析

毕奔腾^{1,2}, 许琦^{1,2}, 杨辰^{1,2}

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004;

2. 联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 广西 桂林 541004)

摘要: 在国际合作突出生态文明理念的总体要求下, 中国和缅甸在共同推进缅甸基础设施建设发展中面临着水资源承载力低、地下水开发与环境保护基础薄弱等挑战。文章系统分析了缅甸不同水文地质单元的地下水赋存条件与地下水环境问题, 揭示了缅甸不同地区地下水资源的开发利用潜力存在不均衡的问题。研究表明: 在中部地区, 冲积层和伊洛瓦底群含水层的地下水潜力大, 勃固群和始新统含水层也存在一定的地下水开发潜力; 在东部高原区, 岩溶地下水的水文地质条件复杂、开发利用难度大; 在西部、东南沿海和三角洲地区, 地下水的开发利用则受到高盐度、砷污染等环境问题的限制。研究有助于从缅甸全域角度深入认识地下水开发利用条件, 为推动缅甸地下水资源的合理规划和开采提供科学依据。

关键词: 缅甸; 地下水赋存特征; 水环境问题

中图分类号: P641

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2023)03-0095-07

0 引言

作为一种基础性的自然资源, 水资源在承载国际合作发展与建设中扮演着重要角色^[1]。缅甸是中国的重要邻国, 也是中南半岛面积最大的国家, 近年来人口及经济农业活动发展迅速, 存在水资源消耗大、时空分布不平衡, 人口密集处用水压力大等诸多问题。探明地下水的赋存空间和环境质量对于中缅共同推进缅甸基础设施建设、水资源合理开发利用具有重要意义。

相较于石油地质与矿产地质, 缅甸的地下水资源与环境研究较为滞后, 少数研究侧重于全球极端气候对缅甸地下水资源的影响^[2]、缅甸河流域的人-水相互作用^[3]、中部干旱区及仰光等局部地区的地下水资源与开发利用情况^[4-5]。我国学者对缅甸水资源的研究主要集中于地表水和

水能开发方面, 如伊洛瓦底江和萨尔温江的水文特性^[6-7]、缅甸水资源的开发潜力^[8-9]、澜沧江—湄公河流域跨界含水层^[10]等, 在系统分析缅甸全域水文地质条件、地下水分布与环境问题方面的研究较少。

本文依托中外合作编图项目, 在收集调研有关文献、报告的基础上, 编制缅甸水文地质简图, 分析缅甸不同水文地质单元的地下水赋存条件与地下水环境问题, 旨在为中缅水资源规划和地质环境保护等提供科学依据。

1 研究区概况

1.1 地形地貌

缅甸地处中南半岛的西北部, 地势整体北高南低, 中部盆地被北、西、东方向的山脉环绕。山脉多呈SN走向, 将缅甸分割成5个地貌区。北部山区

收稿日期: 2022-05-23; 修订日期: 2023-05-11。

基金项目: 中央地质调查项目“一带一路重点区岩溶地质调查与编图(编号: DD20221808)”和“云平台地质调查岩溶所节点运行维护与网络安全保障(编号: DD20230720)”联合资助。

第一作者简介: 毕奔腾(1990—), 男, 助理研究员, 主要从事地质信息、综合编图等方面的研究工作。Email: bibenteng@163.com。

通信作者简介: 许琦(1984—), 男, 高级工程师, 主要从事水文地质、境外编图等方面的研究工作。Email: arqnlw2008@163.com。

属喜马拉雅山脉的东南边缘,包括缅甸的最高峰开卡博峰(海拔 5 881 m);西部的若开丘陵山区阻挡了西南季风向内地输送水汽;东部的掸邦高原岩溶地貌发育,多见褶皱山脉和深大断裂,构造上属中国云贵高原的外延;中部的中央盆地和南部的沿海平原地势低平,其中勃固山区丘陵起伏,而三角洲地区则河道成网,雨季成为洪泛区。

1.2 气象水文

缅甸的气候主要受印度夏季季风以及孟加拉湾对流降雨的影响,降水区域具有明显的分带性。总体上,临海地区雨量最多,北部和东部山区雨量次之,中部地区雨量最少,被称为“中部干旱地区”。

缅甸大部分河流为 SN 走向,境内有 4 条主要水系,即伊洛瓦底江、萨尔温江、钦敦江及锡唐江(图 1)。一般将缅甸划分为 8 个主要流域,地表水和地下水潜力为 1 082 km³/a 和 495 km³/a(表 1)。时空上,地表水平均径流能力分布随着降雨模式变化,以西部沿海若开流域和南部沿海丹那沙林流域最大。作为缅甸农业和人口分布最为密集的伊洛瓦底江下游流域,其单位面积年平均径流量最少(湄公河流域除外),然而其地下水存储潜力最大,远超过其他流域,伊洛瓦底江下游流域地下水的开发具有解决水资源短缺问题的巨大潜力。

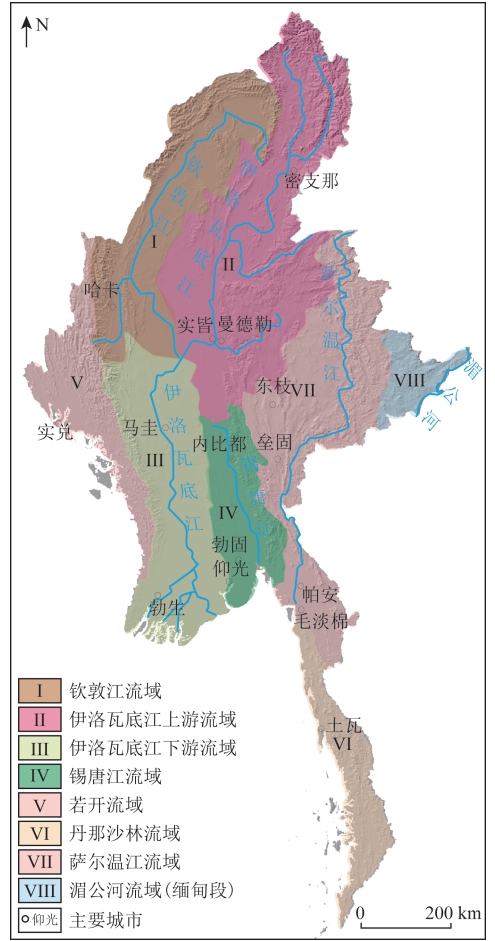


图 1 缅甸主要流域分布

Fig. 1 Distribution of main watersheds in Myanmar

表 1 缅甸的年平均水资源潜力^[11]

Tab. 1 Average annual water resource potential of Myanmar^[11]

流域名称	流域面积/10 ³ km ²	年平均径流量/ (km ³ · a ⁻¹)	单位面积平均径流量/ (km ³ · a ⁻¹ · km ⁻²)	地下水储量/ (km ³ · a ⁻¹)	单位面积地下水储量/ (km ³ · a ⁻¹ · km ⁻²)
钦敦江流域	115.30	141.293	1.225	57.578	0.499
伊洛瓦底江上游流域	193.30	227.920	1.179	92.599	0.479
伊洛瓦底江下游流域	95.60	85.800	0.897	153.249	1.603
锡唐河流域	48.10	81.148	1.687	28.402	0.590
若开流域	58.30	139.245	2.388	41.774	0.717
丹那沙林流域	40.60	130.927	3.225	39.278	0.967
萨尔温江流域	158.00	257.918	1.632	74.779	0.473
湄公河流域(缅甸段)	28.60	17.634	0.617	7.054	0.247
总计	737.80	1 081.885	—	494.713	—

注：“—”为未计算。

1.3 区域地质

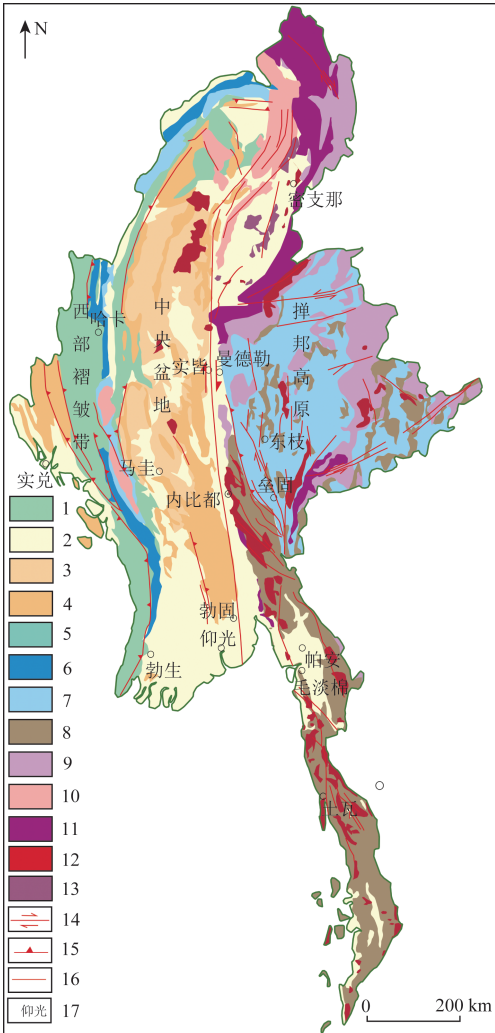
根据大地构造环境,缅甸地质分为西部褶皱带、中央盆地和东部掸邦板块 3 个构造单元(图 2)。西部褶皱带在构造上发育有一系列向西推覆的逆断层及紧密褶皱,主要由中新世磨拉石和白垩纪—始新世巨厚的复理石型沉积序列组成,并伴有

变质作用和蛇绿岩套混杂堆积^[12]。

中央盆地呈近 SN 向的弓型展布,是印度板块与欧亚板块碰撞的过渡地区^[13],该区域内除少数地区出露白垩系,其余多被新生代沉积物覆盖。渐新统一中新统勃固群主要出露于勃固山区及伊洛瓦江西侧,为海相(南部)或河流相(北部)碎屑岩;

上新统一更新统伊洛瓦底群主要分布在伊洛瓦底江两侧,不整合覆盖于勃固群之上,由浅黄或浅红色砂质岩夹少量页岩组成,弱胶结,属河流三角洲相沉积;第四系主要发育于江河流域,由阶地及河床冲积层组成。

东部掸邦板块是特提斯构造体系正向碰撞和侧向走滑的转换带,基底主要为浅变质的板岩(昌马支群),以上广泛出露中生代灰岩、白云岩和碎屑沉积岩(丹老群)。掸邦板块西缘与北缘称抹谷变质岩带,由大理岩、片岩和局部花岗岩相的片麻岩组成。



1. 始新统复理石; 2. 冲积层; 3. 上新统一更新统伊洛瓦底组; 4. 渐新统一中新统勃固群; 5. 白垩系海相沉积; 6. 三叠系石灰岩; 7. 中二叠统一三叠系灰岩; 8. 石炭系丹老群; 9. 前寒武系-寒武系羌梅吉群; 10. 中生代变质岩带; 11. 抹谷变质岩带; 12. 中生代花岗岩和火山岩; 13. 蛇绿岩套; 14. 走滑断裂; 15. 逆冲断裂; 16. 其他断裂; 17. 地名

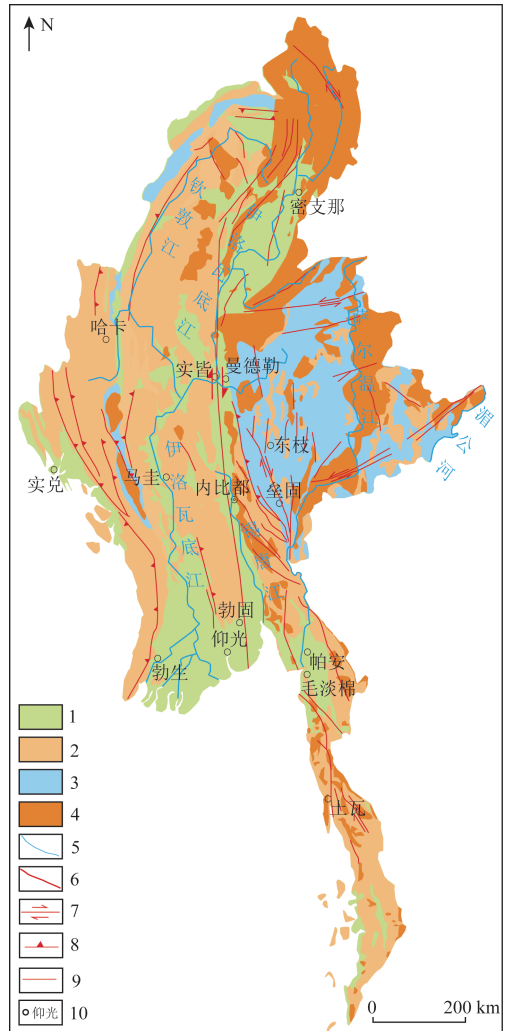
图2 缅甸构造地质图

Fig.2 Tectonic geological map of Myanmar

2 地下水类型及赋存特征

2.1 松散岩类孔隙水

松散岩类孔隙水主要分布于伊洛瓦底江的河谷地带和滨海平原,在锡唐江河谷、萨尔温江入海口以及其他海岸带也有分布(图3),沉积物以第四系冲洪积-冲积松散砂砾石层为主,不整合覆盖于伊洛瓦底群和勃固群之上,呈由北向南变厚的特征,决定着含水岩组的空间结构以及地下水运动的过程,为地下水存储、运移提供了空间通道及动力条件。松散岩类孔隙水的地下水位具有季节性变化的特征,补给以大气降水为主。丰水期伊洛瓦底



1. 松散岩类孔隙水; 2. 碎屑岩类孔隙裂隙水; 3. 碳酸盐岩类岩溶水; 4. 变质岩-侵入岩类裂隙水; 5. 主要河流; 6. 主要断裂; 7. 走滑断裂; 8. 逆冲断裂; 9. 其他断裂; 10. 地名

图3 缅甸水文地质简图

Fig.3 Hydrogeological sketch of Myanmar

江水位高于地下水位,地下水接受伊洛瓦底江水补给,枯水期伊洛瓦底江水位低于地下水位,地下水向伊洛瓦底江排泄,构成地下水、地表水相互补排关系。松散岩类孔隙水储量大,地下水位浅,且分布于人口与灌溉集中区,是缅甸地下水的主要用水来源。

表2给出了缅甸主要流域地区地下水化学组分统计,可见伊洛瓦底江下游流域的地下水呈近中性至微碱性,pH值为6.3~7.7。但在三角洲及滨海地区,由于极端天气和超负荷开采等影响,海水入侵较为严重,如锡唐江下游流域三角洲地区测得地下水的电导率最大值为3 381 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

表2 缅甸主要流域水化学指标统计^[14]Tab. 2 Groundwater chemistry indicators in the main watersheds of Myanmar^[14]

采样位置	含水层	统计指标	电导率/ ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	pH值	浓度/($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)							
					Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
锡唐江下游流域	全新世冲积物	Min	109	4.8	0.03	0.04	0.3	0.10	0.30	0.20	—	—
		Med	866	7.5	0.20	0.30	6.4	0.10	5.20	1.50	0.003	0.10
		Max	3 381	8.3	1.40	1.00	22.0	0.40	8.90	23.00	0.440	1.20
伊洛瓦底江下游流域	全新世冲积物	Min	123	6.3	0.30	0.20	0.4	0.04	1.58	0.03	—	—
		Med	710	7.2	0.80	0.50	1.4	0.07	4.70	1.10	0.003	0.01
		Max	1 366	7.7	2.10	2.20	6.5	1.90	8.00	11.00	0.300	0.30
萨尔温江流域	灰岩和白云岩	Min	63.9	5.5	0.10	0.03	0.1	0.00	0.40	0.01	0.001	—
		Med	419	7.0	1.30	0.30	0.4	0.02	3.80	0.30	0.040	0.02
		Max	734	7.9	2.30	1.00	1.5	1.00	7.50	2.00	0.500	0.90
钦敦江流域	白垩纪—始新世复理石	Min	367	6.3	0.15	0.50	0.4	0.01	3.60	—	0.002	—
		Med	1 016	7.1	1.83	1.10	1.2	0.02	6.40	0.20	0.430	0.02
		Max	2 734	8.4	4.80	5.60	16.0	0.10	21.00	4.10	6.200	0.40
伊洛瓦底江上游流域	勃固群砂岩、页岩	Min	401	7.1	0.10	0.06	0.3	0.01	4.40	0.02	—	—
		Med	1 037	7.7	2.00	1.50	3.8	0.05	9.60	1.30	0.460	0.02
		Max	2 035	8.6	4.40	3.60	12.0	4.40	15.00	6.30	5.800	3.10

注：“—”为无数据。

2.2 碎屑岩类孔隙裂隙水

碎屑岩类孔隙裂隙水主要分布于中西部和东南地区的高原、山地、山间盆地。含水层受裂隙和孔隙发育影响,地下水赋水条件差异较大,岩性、厚度、埋藏深度变化较大,富水性极不均一。含水岩组有伊洛瓦底群、勃固群、白垩纪—始新世复理石、石炭系丹老群。

伊洛瓦底群含水层广泛出露于伊洛瓦底江西侧的实皆和马圭地区,由松散的泥质砂岩和砂砾岩组成,胶结不紧密,通常呈半固结状态,含有丰富的铁质,属河流三角洲相沉积,具有较大的透水性。伊洛瓦底江群含水层厚度较大,在实皆地区钻井最大深度120 m,在马圭地区350 m深度的出水量依然可达360~1 600 m^3/d ^[15]。

勃固群含水层主要出露于伊洛瓦底江下游东侧的曼德勒、马圭和勃固地区,西部滨海地区也有少量分布。勃固群由中新世致密的砂岩、粉砂岩和页岩组成,透水性差,淡水的自然储备潜力有限。只有在断裂密集分布区,地层裂隙发育,可大量赋存地下水。如在马圭敏巫盆地,最大井深165 m,缺

水量可达540 m^3/d ^[15],但其地下水具有较高的电导率值(中位数为1 037 $\mu\text{S}/\text{cm}$)。

白垩纪—始新世复理石含水层主要出露于西部山区的丘陵地带,为砂岩、页岩和黏土岩互层的巨厚复理石型沉积序列,由于靠近海岸线,该区受海水入侵影响严重,地下水多为咸水,淡水的分布有限。

石炭系丹老群含水层分布于掸邦高原和德林达依山脉的西部边缘,发育灰砾岩、石英岩、泥质岩、板岩、泥岩、砾石等,该区地下水还有待研究。

2.3 碳酸盐岩类岩溶水

碳酸盐岩类岩溶水主要分布于掸邦高原,西部地区也有条带状分布。岩溶面积约80 000 km^2 ,占全国总面积20%以上,主要为二叠纪—三叠纪灰岩、白云岩,总厚度超过1 000 m,最厚处达2 000 m,地貌上表现为灰岩区峰丛地貌、白云岩区塔峰、锥峰、溶丘、盲谷等形态,是典型的热带岩溶特征。碳酸盐岩强烈的岩溶及下伏向斜构造环境,是该区地下水资源赋存的有利条件。在萨尔温江流域的大多数样品中测得了较低的电导率值(中位数小于500 $\mu\text{S}/\text{cm}$),可能是由于地下水源补给迅

速而集中,且具有较低的蒸发率。水化学组分中主要阳离子含量顺序为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$, 主要阴离子含量顺序为 $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$ 。虽然岩溶水水量丰富,但分布不均匀,区域及时空变化大。一些地区具有大型地下河系统,如红河洞、弗鲁索洞等。对格劳镇周围进行洞穴调查,也发现了具有复杂分支、长达数十 km 的地下河系统。它们通常受季风影响,是高度动态的水文系统。除了少数出露的岩溶泉和地下河出口,更多的隐伏地下水通过深断层直接补给到河流或湖泊^[16]。缅甸第二大湖茵莱湖的平均 pH 值为 8.27^[17],表明碳酸盐平衡在其水化学中占主导作用,除了存在周围的河流补给,该湖还存在地下水和深断层的温泉补给。

2.4 变质岩-侵入岩类裂隙水

变质岩-侵入岩类裂隙水主要分布于缅甸北部山区和东部高原,在东南部地区也有零星分布,含水性差。变质岩为前寒武系昌马支群,主要岩性为浅变质砂页岩、灰色千枚岩、片岩等,厚度达 3 000 m,发育较多石英脉。这类地下水的埋藏和分布受地质构造控制,在断层蓄水构造、岩脉蓄水构造中打井出水成功率高。由于钻井难度大,经济成本高,目前只有缅甸东南部的火山岩中有开采出地下水的记录。

3 地下水环境问题

3.1 高盐地下水

高盐地下水对于农业灌溉和人体饮用健康均会产生严重影响,并会直接降低作物产量,间接破坏土壤渗透和结构。高盐地下水在缅甸中部和沿海含水层中普遍存在,是缅甸地下水开采利用中面临的极大挑战。

缅甸中部地区干旱半干旱的气候特点为高盐地下水的形成创造了有利的条件。捕获海洋盐分的降水进入内陆,在向下渗透过程中积聚在含水层中。近年来的极端气候显著改变了地下水的补给量,长期的干旱和高温使缅甸中部地表水蒸发加强,地下水的补给量大大减少,地下水化学组分的溶滤迁移作用不充分,导致含盐量较高。此外,勃固群的海相沉积地层(始新世海相页岩和砂岩)中也普遍残留大量盐分,在深层石油勘探井中,出水的盐度甚至超过了海水。

除中部干旱地区外,缅甸沿海地带,包括缅甸西部若开邦、南部德林达依、伊洛瓦底三角洲等地区也深受高盐地下水的影响,其地下水的高盐度主要是由海水入侵引起。特别是伊洛瓦底三角洲地区,一方面气候变化和全球气候变暖导致海平面上升,另一方面伊洛瓦底三角洲地区是缅甸最重要的农业种植地,大规模的灌溉开发导致渗漏增加,水位上升,这可能将盐分带到根区或土壤表面。研究表明,红树林与地下水系统(补给和排放)密切相关。但在三角洲地区居民为了发展养殖、建设鱼塘,大量砍伐红树林,导致更多的海水无缓冲地侵入内陆地下水^[18]。

3.2 高砷地下水

地下水砷污染是严重的环境与安全健康问题,长期饮用砷含量超标的地下水易引发各种身体病变。砷污染的土壤、灌溉水会降低种子发芽率,影响根系生长的发育,进而大大降低水稻产量^[19]。

尽管目前尚未在缅甸全境开展广泛的地下水污染程度调查,但基于抽样调查报告和插值模拟结果表明缅甸很多地区,特别是伊洛瓦底江三角洲地下水砷含量远远超过了饮用水标准(表3)。据报道,在伊洛瓦底三角洲地区及河流两岸,约 340 万人受到高砷地下水影响^[20]。有研究表明,伊洛瓦底三角洲砷污染来源于地层中铁氧化物的溶解以及喜马拉雅山的砷沉积物,并且在富含有机物的全新统构成的含水层中最为普遍^[21-22]。而地下水中砷污染的主要驱动力可归因于地表水对地下水的补给,以及用于饮用水和灌溉目的的抽水。

表3 缅甸各地区检测水样中含砷样本比例^[23]

Tab.3 Percentage of samples containing arsenic in water samples tested in various regions of Myanmar^[23]

地区	样本总数/个	样本比例		
		As < 10 μg/L	10 μg/L < As < 50 μg/L	As > 50 μg/L
伊洛瓦底	134 123	65.5%	27.0%	7.6%
勃固	90 145	52.3%	39.3%	8.3%
实皆	8 807	79.4%	18.4%	2.2%
曼德勒	21 560	80.8%	17.8%	1.4%
若开邦	5 704	53.4%	38.4%	8.3%
钦邦	1 605	95.5%	4.1%	0.5%
掸邦	3 016	79.0%	15.6%	5.4%
孟邦	2 116	90.3%	16.8%	2.9%
马圭	529	80.5%	18.2%	1.3%
仰光	4 149	84.4%	13.9%	1.7%
德林达依	1 000	98.6%	1.4%	未测
合计	272 754	63.5%	29.6%	6.9%

4 结论

(1) 缅甸中部地区, 冲积层和伊洛瓦底群含水层的地下水储量大、埋藏浅、开采难度小, 除三角洲以外地下水质量较好, 适合灌溉和饮用。而勃固群和始新统含水层的地下水埋藏深、开采难度大, 同时含盐分高, 只适用于一般用途。

(2) 缅甸东部高原区, 由于岩溶地区水文地质条件复杂, 岩溶地下水开发利用难度大等原因, 应通过表层岩溶泉蓄引取水、地下河巷道截水、钻井取水等方式因地制宜开发利用地下水。

(3) 缅甸西部、东南沿海和三角洲地区, 地下水的开发利用受到高盐度和砷污染等环境问题的限制, 但该地区季节性降雨丰富, 可促进地表水应急水源地建设, 以洪补枯, 缓解季节性缺水矛盾。

今后的工作重点为推动地下水的合理开发与环境效益纳入两国合作开发的顶层设计中, 进一步分析缅甸地下水资源开发利用潜力, 综合评估水资源对区域发展的支撑能力, 为中缅经济协调发展, 提供地下水资源功能保障与环境保护科学依据。

参考文献 (References) :

[1] 杨艳昭, 封志明, 孙通, 等. “一带一路”沿线国家水资源禀赋及开发利用分析[J]. 自然资源学报, 2019, 34(6): 1146 - 1156.
Yang Y Z, Feng Z M, Sun T, et al. Water resources endowment and exploitation and utilization of countries along the belt and road[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(6): 1146 - 1156.

[2] Zaw T, Than M M. Climate change and groundwater resources in Myanmar[J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2017, 5(1): 59 - 66.

[3] Taft L, Evers M. A review of current and possible future human - water dynamics in Myanmar's River basins [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2016, 20(12): 4913 - 4928.

[4] Khaing K K. Groundwater Environment in Yangon, Myanmar[M]// Shrestha S, Pandey V P, Shivakoti B R, et al. Groundwater Environment in Asian Cities. Amsterdam; Elsevier, 2016: 317 - 335.

[5] Pavelic P, Johnston R, McCartney M, et al. Groundwater Resources In the Dry Zone of Myanmar: A Review of Current Knowledge[M]// Mukherjee A. Groundwater of South Asia. Singapore: Springer, 2018: 695 - 705.

[6] 刘冬英, 陈玺, 黄燕, 等. 缅甸伊洛瓦底江流域水文资料初步复核评价[J]. 人民长江, 2018, 49(22): 112 - 117.
Liu D Y, Chen X, Huang Y, et al. Preliminary recheck and evalua-

tion of hydrological data in Irrawaddy River Basin, Myanmar[J]. Yangtze River, 2018, 49(22): 112 - 117.

[7] 贾建伟, 蒋鸣, 吕孙云, 等. 中缅境内怒江—萨尔温江水文特性对比分析[J]. 人民长江, 2014, 45(S2): 9 - 11.
Jia J W, Jiang M, Lv S Y, et al. Comparative analysis of hydrological characteristics of The Nu River and Salween River in China and Myanmar[J]. Yangtze River, 2014, 45(S2): 9 - 11.

[8] 米良. 缅甸水资源开发方式及应注意的问题[J]. 学术探索, 2015(7): 20 - 25.
Mi L. The water resources exploitation and the related policy and law in Burma[J]. Academic Exploration, 2015(7): 20 - 25.

[9] 朴光姬, 李芳. “一带一路”对接缅甸水资源开发新思路研究[J]. 南亚研究, 2017(4): 60 - 77.
Piao G J, Li F. New thinking on development of water resources in Myanmar under the belt and road initiative[J]. South Asian Studies, 2017(4): 60 - 77.

[10] 何静, 韩再生, 牛磊. 澜沧江—湄公河流域跨界含水层研究[J]. 地学前缘, 2011, 18(6): 358 - 366.
He J, Han Z S, Niu L. Trans - boundary aquifers analysis in Lancang - Mekong River basin [J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(6): 358 - 366.

[11] Zaw T, Moe A K, Ko M, et al. Groundwater Resources of Myanmar[M]// Mukherjee A. Groundwater of South Asia. Singapore: Springer, 2018: 153 - 168.

[12] Gardiner N J, Robb L J, Morley C K, et al. The tectonic and metallogenic framework of Myanmar: A Tethyan mineral system[J]. Ore Geology Reviews, 2016, 79: 26 - 45.

[13] Cai F L, Ding L, Zhang Q H, et al. Initiation and evolution of forearc basins in the central Myanmar depression[J]. GSA Bulletin, 2020, 132(5 - 6): 1066 - 1082.

[14] Pincetti - Zúniga G P, Richards L A, Tun Y M, et al. Major and trace (including arsenic) groundwater chemistry in central and Southern Myanmar [J]. Applied Geochemistry, 2020, 115: 104535.

[15] McCartney M, Pavelic P, Lacombe G, et al. Water Resources Assessment of the Dry Zone of Myanmar[R]. International Water Management Institute, 2013.

[16] Jiang G H, Chen Z, Siripompibul C, et al. The karst water environment in Southeast Asia; Characteristics, challenges, and approaches[J]. Hydrogeology Journal, 2021, 29(1): 123 - 135.

[17] Re V, Thin M M, Setti M, et al. Present status and future criticalities evidenced by an integrated assessment of water resources quality at catchment scale: The case of Inle Lake (southern Shan State, Myanmar)[J]. Applied Geochemistry, 2018, 92: 82 - 93.

[18] Sakai T, Omori K, Oo A N, et al. Monitoring saline intrusion in the Ayeyarwady Delta, Myanmar, using data from the Sentinel - 2 satellite mission[J]. Paddy and Water Environment, 2021, 19(2): 283 - 294.

[19] Dutta P, Bandopadhyay P. Arsenic pollution in agriculture: Its uptake and metabolism in plant system[J]. Agricultural Research & Technology: Open Access Journal, 2016, 1(5): 555573.

- [20] Shaji E, Santosh M, Sarath K V, et al. Arsenic contamination of groundwater: A global synopsis with focus on the Indian Peninsula[J]. *Geoscience Frontiers*, 2021, 12(3): 101079.
- [21] Winkel L, Berg M, Amini M, et al. Predicting groundwater arsenic contamination in southeast Asia from surface parameters[J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1(8): 536–542.
- [22] van Geen A, Win K H, Zaw T, et al. Confirmation of elevated arsenic levels in groundwater of Myanmar[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 478: 21–24.
- [23] Aung K T, Zaw N A K. Myanmar Country Presentation: Groundwater Survey and Utilization & Geo-Environment Sustainable Development of Great Mekong Sub-Region, Beijing, 2016[C].

Analysis of groundwater occurrence characteristics and water environment issues in Myanmar

BI Benteng^{1,2}, XU Qi^{1,2}, YANG Chen^{1,2}

(1. *Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences/Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Natural Resources & Guangxi, Guangxi Guilin 541004, China*; 2. *International Research Center on Karst under the Auspices of UNESCO, Guangxi Guilin 541004, China*)

Abstract: Under the general requirement of highlighting the concept of ecological civilization during international cooperation in construction, China and Myanmar are facing challenges in jointly promoting infrastructure development, such as low water resources carrying capacity, weak foundation of groundwater development and environmental protection. The authors in this paper systematically analyzed the groundwater occurrence conditions and groundwater environmental issues in different hydrogeological units in Myanmar, and revealed uneven potential for groundwater resources development and utilization in different regions of Myanmar. In the central plateau, alluvial and Ayeyarwady Group aquifers have high groundwater potentiality, while Pegu Group and Eocene aquifers have certain potentiality in groundwater utilization. In the eastern highland region, the hydrogeological conditions of karst groundwater are complex and difficult to develop and utilize. In the western, southeastern coastal and delta regions, the groundwater exploitation is severely limited by environmental groundwater problems such as high salinity and arsenic content. This research contributes to a systematic understanding of the hydrogeological conditions across Myanmar and provides scientific basis for promoting rational planning and exploitation of groundwater resources in Myanmar.

Keywords: Myanmar; groundwater occurrence characteristics; water environment issues

(责任编辑: 魏昊明, 王晗)